

Humboldt-Universität zu Berlin

Dissertation

**Erfassung, Analyse und Modellierung  
des Wurzelwachstums von Weizen  
(*Triticum aestivum* L.) unter  
Berücksichtigung der räumlichen  
Heterogenität der Pedosphäre**

zur Erlangung des akademischen Grades  
doctor rerum agriculturalarum  
(Dr. rer. agr.)

eingereicht an der  
Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät

von  
Anna Schulte-Eickholt  
geb. am 18.12.1977 in Düren

Präsident der Humboldt-Universität:

Prof. Dr. Dr. h. c. Christoph Marksches

Dekan der Landwirtschaftlich-Gärtnerischen Fakultät:

Prof. Dr. Dr. h. c. Otto Kaufmann

Gutachter: 1. Prof. Dr. Ruprecht Herbst

2. Prof. Dr. Matthias Langensiepen

3. Dr. Armin Werner

Tag der mündlichen Prüfung: 01. Juli 2009



## Abstract

The aim of this study was to measure and model winter wheat root growth to improve site-specific soil and fertilizer management in commercial wheat fields. A novel approach for characterizing heterogeneities in soil physical properties was developed for this purpose. Field variations in root length densities were analysed at two contrasting sites in East-Germany during two vegetation seasons. A semi-automated root analysing method was developed to facilitate analyses of large numbers of samples. Influences of variations in soil water states, bulk densities and penetration resistances on spatial distributions of roots were quantified. Differences in soil characteristics were large between the two sites and affected root growth considerably. The same field data was used for validating the soil moisture and root growth calculations of the widely applied growth model CERES-Wheat. The model was carefully calibrated under optimum management conditions before the validation studies at both sites with measured growth data from local cultivars. Root length densities were consistently underestimated by 25 and 35 %, irrespective of large differences in soil physical properties. The model overestimated soil water content below field capacity and underestimated it above this range. Simulations of temporal changes in root length densities and soil water states were inadequate. The root mean square error for soil water contents and root length densities were up to 17 Vol% and 1.2 cm cm<sup>3</sup>, respectively. Since the qualities and variabilities of rainfall data strongly influence the accuracies of model calculations an uncertainty analysis was conducted by changing the amount of actually measured rainfall between -70 and +130 % in 10 % steps. The effects of these changes on simulated root length densities and soil water contents were negligible low. Changes of root mean square errors of simulated soil water contents and root length densities ranged between 0.9 to 1.9 Vol% and 0.01 to 0.11 cm cm<sup>3</sup>, respectively.

The second aim of this study was to develop a methodology for generating soil information for practical management purposes at a high degree of spatial resolution using limited input information. The corresponding model calculations were carried out based on the Dempster and Shafer theorem. It facilitates the processing of deductive expert knowledge in tandem with spatial advance information and actual field data. Soil types and texture classes were determined with multimodally and multitemporally captured data of soil electrical conductivities which are required input data of the new model approach. Training sites representing typical soils of the investigation area as well as their *a priori* probabilities have

to be predefined as well. The model generates a digital map with extensive information of spatial variations in soil properties. Beside mono signatures for which training sites were defined, the model produces so called mixed signatures which often appear in transition regions of mono signatures and consequently describe typical soil transitions. The validation of the soil map with soil data from independent measurements yielded close correlation between measured and calculated values.

**Keywords**

apparent electrical conductivity; CERES-Wheat; Dempster-Shafer theorem; DSSAT; image analysis; modeling; precision agriculture; root growth; root length density; soil heterogeneity; soil water content; spatial and temporal variability; *Triticum aestivum* L.; validation; winter wheat

## Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit war, Wurzelwachstum von Winterweizen zu erfassen und zu modellieren, um teilflächenspezifisches Boden- und Düngemanagement zu verbessern. Zu diesem Zweck wurde ein neuer Modellansatz zur Charakterisierung der Heterogenität bodenphysikalischer Eigenschaften entwickelt. Die Variation von Wurzellängendichten im Feld wurde über zwei Vegetationsperioden hinweg an zwei unterschiedlichen Standorten in Ostdeutschland untersucht. Um die Auswertung der hohen Anzahl an Wurzelproben zu erleichtern, wurde eine halbautomatische Methode zur Bildanalyse von Wurzeln entwickelt. Der Einfluss von Änderungen bezüglich Bodenwasserstatus und Bodendichte bzw. Durchdringungswiderstand auf das Wurzelwachstum wurde untersucht. Die deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Versuchsstandorten bezüglich dieser Bodeneigenschaften hatten beträchtlichen Einfluss auf das Wurzelwachstum. Die erhobenen Felddaten dienten gleichzeitig dazu, die Bodenwasser- und Wurzelwachstumsberechnung des weit verbreiteten Modells CERES-Wheat zu validieren. Das Modell wurde vor den Validationen unter optimalen Wachstumsbedingungen und unter Verwendung von im Feld gemessenen Daten einheimischer Weizensorten sorgfältig kalibriert. Abgesehen von den beträchtlichen Unterschieden zwischen den Bodeneigenschaften wurden auch die Wurzellängendichten erheblich um 25 - 35 % unterschätzt. Das Modell überschätzte Bodenwassergehalte unterhalb der Feldkapazität und unterschätzte sie oberhalb dieses Bereiches. Die Simulationen der zeitlichen Änderungen von Bodenwassergehalten und Wurzellängendichten waren ebenfalls unzureichend. Die mittleren Fehler betrugen für den Wassergehalt bis zu 17 Vol%, für die Wurzellängendichten  $1.2 \text{ cm cm}^3$ . Da sich Qualität und Variabilität von Niederschlagsdaten stark auf die Genauigkeit der Modellkalkulationen auswirken, wurde eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt, indem die gemessenen Niederschlagsmengen in 10%-Stufen von -70 bis +130 % verändert wurden. Der Effekt dieser Änderungen auf die Simulationen von Wurzellängendichten und Bodenwassergehalten war jedoch extrem gering. Die Fehler-spannweiten der simulierten Bodenwassergehalte bewegten sich zwischen 0.9 und 1.9 Vol%, die der Wurzellängendichten zwischen  $0.01$  und  $0.11 \text{ cm cm}^3$ .

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war, eine Methode für praktische Zwecke zu entwickeln, mit der die Generierung von räumlich hoch aufgelösten Bodeninformationen unter Verwendung limitierter Eingangsdaten möglich ist. Die Modellkalkulationen basieren auf der Dempster-Shafer-Theorie, die eine Verarbeitung von deduktivem Expertenwissen in Verbindung mit

räumlichen Vorinformationen und aktuellen Felddaten vereinfacht. Anhand von multi-temporal und multimodal erfassten Bodenleitfähigkeitsdaten, die Eingangsdaten für den Modellansatz sind, wurden Bodentypen und Texturklassen bestimmt. Für die Berechnungen mussten Trainingsareale, die typische Böden der Versuchsfläche repräsentieren, sowie deren *a priori*-Wahrscheinlichkeiten festgelegt werden. Das Modell generiert eine digitale Bodenkarte, die flächenhafte Informationen über Bodentypen und Bodeneigenschaften enthält. Neben Monosignaturen, für die Trainingsareale definiert wurden, werden auch so genannte Mischsignaturen ausgewiesen. Diese Mischsignaturen befinden sich häufig in den Übergangsbereichen von Monosignaturen und beschreiben somit typische Bodenübergänge. Die Validation der Bodenkarte mit zusätzlich erhobenen Bodeninformationen ergab gute bis sehr gute Ergebnisse.

### **Schlagwörter**

Bildanalyse; Bodenheterogenität; Bodenwassergehalt; CERES-Wheat; Dempster-Shafer-Theorie; DSSAT; Modellierung; Präzisionslandwirtschaft; räumliche und zeitliche Variabilität; scheinbare elektrische Leitfähigkeit; *Triticum aestivum* L.; Validierung; Winterweizen; Wurzellängendichte; Wurzelwachstum

## Inhalt

<b>1</b>	<b>ALLGEMEINE EINLEITUNG .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>UNTERSUCHUNGSGEBIETE .....</b>	<b>13</b>
2.1	Übersicht und Lage .....	15
2.2	Klima .....	15
2.2.1	Wulfen .....	15
2.2.2	Groß Twülpstedt .....	17
2.3	Geogenese und Relief .....	18
2.3.1	Wulfen .....	18
2.3.2	Groß Twülpstedt .....	18
2.4	Pedogenese und Bodenverbreitung .....	18
2.4.1	Wulfen .....	18
2.4.2	Groß Twülpstedt .....	19
<b>3</b>	<b>BESTIMMUNG DER WURZELLÄNGENDICHTE VON GETREIDE UNTER VERWENDUNG DER MATLAB IMAGE PROCESSING TOOLBOX .....</b>	<b>21</b>
3.1	Einleitung .....	23
3.2	Material und Methoden .....	24
3.2.1	Probennahme und Probenaufbereitung .....	24
3.2.2	Bildanalyse .....	25
3.2.3	Referenzmessungen .....	27
3.2.4	Wurzeldurchmesser .....	28
3.3	Ergebnisse .....	28
3.4	Diskussion .....	32
<b>4</b>	<b>UNTERSUCHUNG DES WURZELWACHSTUMS VON WINTERWEIZEN AN ZWEI UNTERSCHIEDLICHEN STANDORTEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VON BODENEIGENSCHAFTEN UND BODENWASSER .....</b>	<b>35</b>
4.1	Einleitung .....	37
4.2	Material und Methoden .....	38
4.2.1	Statistische Auswertung .....	38
4.2.2	Wurzeluntersuchungen .....	38
4.2.3	Bodenwassermessung .....	38
4.2.4	Bodendaten .....	40
4.3	Ergebnisse und Diskussion .....	40

<b>5</b>	<b>MODELLIERUNG DER EFFEKTE VON STANDORTSPEZIFISCHEN UND ZEITLICHEN VARIATIONEN DES BODENWASSERGEHALTES AUF DAS WURZELWACHSTUM VON WINTERWEIZEN MIT DEM MODELL CERES-WHEAT .....</b>	<b>61</b>
5.1	Einleitung .....	63
5.2	Material und Methoden .....	64
5.2.1	Eingangsdaten für die Modellierung .....	64
5.2.2	Das DSSAT-Modell .....	65
5.2.3	Kalibrierung des Modells .....	71
5.2.4	Validierung des Modells .....	72
5.3	Ergebnisse und Diskussion.....	73
<b>6</b>	<b>METHODISCHER VORSCHLAG FÜR EIN GIS-BASIERTES MODELL ZUR HOCH AUFLÖSENDEN BEREITSTELLUNG VON BODENDATEN AUF BASIS DER DEMPSTER-SHAFER THEORIE .....</b>	<b>89</b>
6.1	Einleitung .....	91
6.2	Material und Methoden .....	93
6.2.1	Theorie nach Dempster und Shafer .....	93
6.2.2	Scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens.....	95
6.2.3	Datenaufbereitung und -verarbeitung.....	96
6.3	Ergebnisse und Diskussion.....	100
<b>7</b>	<b>ALLGEMEINE DISKUSSION.....</b>	<b>111</b>
<b>8</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK.....</b>	<b>123</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>127</b>
	<b>Danksagung.....</b>	<b>139</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Hilfsmittel zur Umsetzung von Precision Agriculture .....	5
Abb. 2.1: Versuchsschläge Finkenherd (a) und Rabenberg (b) .....	16
Abb. 2.2: Niederschlag, potenzielle Evapotranspiration und klimatische Wasserbilanz für die Region Wulfen, Sachsen-Anhalt .....	16
Abb. 2.3: Niederschlag, potenzielle Evapotranspiration und klimatische Wasserbilanz für die Region Groß Twülpstedt, Niedersachsen .....	17
Abb. 3.1: Aufbau der Scan-Apparatur .....	26
Abb. 3.2: Ergebnisse der Referenzmessungen mit der modifizierten Linien-Intersektionsmethode .....	27
Abb. 3.3: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Wurzeldurchmesser .....	29
Abb. 3.4: Zwei willkürlich geänderte Verteilungen von Wurzeldurchmessern .....	29
Abb. 3.5: Beziehung zwischen den Ergebnissen der Bildanalyse und den Referenzmessungen .....	31
Abb. 3.6: Bilder eingescannter Wurzeln aus einer Bodentiefe von 75 – 90 cm mit unzureichender und ausreichender Ausleuchtung und die daraus resultierenden Binärbilder .....	32
Abb. 4.1: Bodenprofile der Intensivmesspunkte 1 und 2 auf dem Versuchsschlag Rabenberg .....	43
Abb. 4.2: Bodenprofile der Intensivmesspunkte 1 und 2 auf dem Versuchsschlag Finkenherd .....	44
Abb. 4.3: Volumetrischer Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen am Intensivmesspunkt 1 auf dem Schlag Rabenberg während der Vegetationsperiode in den Jahren 2005 und 2006 .....	46
Abb. 4.4: Volumetrischer Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen am Intensivmesspunkt 2 auf dem Schlag Rabenberg während der Vegetationsperiode in den Jahren 2005 und 2006 .....	46
Abb. 4.5: Volumetrischer Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen am Intensivmesspunkt 1 auf dem Schlag Finkenherd während der Vegetationsperiode in den Jahren 2005 und 2006 .....	48
Abb. 4.6: Volumetrischer Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen am Intensivmesspunkt 2 auf dem Schlag Finkenherd während der Vegetationsperiode in den Jahren 2005 und 2006 .....	48
Abb. 4.7: Gravimetrischer Bodenwassergehalt auf dem Schlag Rabenberg an den unterschiedlichen Monitoringpunkten in den Jahren 2005 und 2006 .....	49
Abb. 4.8: Gravimetrischer Bodenwassergehalt auf dem Schlag Finkenherd an den unterschiedlichen Monitoringpunkten in den Jahren 2005 und 2006 .....	49
Abb. 4.9: Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen an den Untersuchungspunkten auf dem Schlag Rabenberg .....	50
Abb. 4.10: Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen an den Untersuchungspunkten auf dem Schlag Finkenherd .....	51

Abb. 4.11: Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen an den Monitoringpunkten auf dem Versuchsschlag Rabenberg und deren Mittelwerte .....	52
Abb. 4.12: Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen an den Monitoringpunkten auf dem Versuchsschlag Finkenherd und deren Mittelwerte .....	52
Abb. 4.13: Mittlere Wurzellängendichten bis 0.9 m Tiefe an den unterschiedlichen Untersuchungspunkten auf dem Schlag Rabenberg .....	54
Abb. 4.14: Mittlere Wurzellängendichten bis 0.9 m Tiefe an den unterschiedlichen Untersuchungspunkten auf dem Schlag Finkenherd .....	54
Abb. 4.15: Beziehung zwischen Abnahme der Wurzellängendichte mit zunehmender Bodentiefe und den Untersuchungszeitpunkten Schossen und Blüte bzw. den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 für den Schlag Rabenberg .....	55
Abb. 4.16: Beziehung zwischen Abnahme der Wurzellängendichte mit zunehmender Bodentiefe und den Untersuchungszeitpunkten Schossen und Blüte bzw. den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 für den Schlag Finkenherd.....	55
Abb. 4.17: Jahressummen der Niederschläge sowie Summen der Niederschläge von Beginn der Vegetationszeit bis zur Blüte in den Jahren 2005 und 2006 für die beiden Versuchsstandorte Groß Twülpstedt und Wulfen .....	58
Abb. 4.18: Klimatische Wasserbilanz für die beiden Versuchsstandorte Groß Twülpstedt und Wulfen von Beginn der Vegetationszeit bis zum Schossen, vom Schossen bis zur Blüte und von Beginn der Vegetationszeit bis zur Blüte in den Jahren 2005 und 2006.....	58
Abb. 4.19: Gesamtmittelwerte der Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen für die Beprobungszeitpunkte Schossen und Blüte auf den Versuchsschlägen Rabenberg und Finkenherd.....	59
Abb. 5.1: Übersicht über die Komponenten und die modulare Struktur des DSSAT-CSM....	66
Abb. 5.2: Im Bodenwasser- und Soil-Plant-Atmosphere interface Modul modellierte Prozesse .....	67
Abb. 5.3: Wurzelpräferenzfaktor nach CERES-Wheat sowie für die Versuchsschläge Finkenherd und Rabenberg.....	72
Abb. 5.4: Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten für den Versuchsschlag Rabenberg.....	74
Abb. 5.5: Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen für den Versuchsschlag Rabenberg.....	74
Abb. 5.6: Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten für den Versuchsschlag Finkenherd.....	76
Abb. 5.7: Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen für den Versuchsschlag Finkenherd.....	76
Abb. 5.8: Beziehung zwischen gemessenem und simuliertem Bodenwassergehalt für den Versuchsschlag Rabenberg.....	78
Abb. 5.9: Beziehung zwischen gemessenem und simuliertem Bodenwassergehalt für den Versuchsschlag Finkenherd.....	78
Abb. 5.10: Kumulative gemessene und simulierte Bodenwassergehalte und Wurzellängendichten zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien an den unterschiedlichen Messpunkten auf dem Versuchsschlag Rabenberg in den Jahren 2005 und 2006 .....	81

Abb. 5.11: Kumulative gemessene und simulierte Bodenwassergehalte und Wurzellängendichten zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien an den unterschiedlichen Messpunkten auf dem Versuchsschlag Finkenherd in den Jahren 2005 und 2006.....	81
Abb. 5.12: Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen und Niederschlag in den Versuchsjahren 2005 und 2006 am Intensivmesspunkt 1 des Versuchsschlages Rabenberg .....	82
Abb. 5.13: Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen und Niederschlag in den Versuchsjahren 2005 und 2006 am Intensivmesspunkt 2 des Versuchsschlages Rabenberg .....	83
Abb. 5.14: Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen und Niederschlag in den Versuchsjahren 2005 und 2006 am Intensivmesspunkt 2 des Versuchsschlages Finkenherd .....	84
Abb. 6.1: Das Belief-Intervall .....	94
Abb. 6.2: Trainingsareale und Bohrungen auf dem Versuchsschlag Rabenberg.....	98
Abb. 6.3: Im Horizontal- und Vertikalmodus gemessene scheinbare elektrische Leitfähigkeit in den Monaten April und August des Jahres 2005.....	101
Abb. 6.4: Reliefsituation auf dem Versuchsschlag Rabenberg.....	101
Abb. 6.5: Raumkorrelation zwischen den ECa-Werten aus Horizontal- und Vertikalmessmodus zu den jeweiligen Messzeitpunkten April und August.....	102
Abb. 6.6: Raumkorrelation zwischen den ECa-Werten von April und August aus den jeweiligen Messmodi horizontal und vertikal .....	102
Abb. 6.7: Karte der Signaturen für den Versuchsschlag Rabenberg.....	104
Abb. 6.8: Prozentuale Häufigkeiten der ermittelten Signaturen für den Versuchsschlag Rabenberg.....	105
Abb. 6.9: Flächenanteile der ermittelten Signaturen für den Versuchsschlag Rabenberg.....	105
Abb. 6.10: Mittelwerte und Standardabweichungen der ECa-Werte aller vier Messungen für die Trainingsareale $a - i$ .....	107
Abb. 7.1: Theoretische Komponenten des Vorhersagefehlers in Modellen mit steigender Komplexität bei bekannter Struktur des zu modellierenden Systems .....	117



## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1: Mittelwert, Standardabweichung und Varianz und Variationskoeffizient der Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen .....	31
Tab. 3.2: Sensitivität der WLD-Kalkulation in Bezug auf unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen von Wurzeldurchmessern.....	32
Tab. 4.1: Anteile der Feinbodenarten Ton, Schluff und Sand und Anteile an Fein-, Mittel- und Grobsand sowie Trockenrohdichte und Lagerungsdichte in den unterschiedlichen Horizonten der Monitoringpunkte auf dem Versuchsschlag Rabenberg.....	41
Tab. 4.2: Anteile der Feinbodenarten Ton, Schluff und Sand und Anteile an Fein-, Mittel- und Grobsand sowie Trockenrohdichte und Lagerungsdichte in den unterschiedlichen Horizonten der Monitoringpunkte auf dem Versuchsschlag Finkenherd.....	42
Tab. 4.3: Ergebnisse des Wilcoxon-Rangsummentests für die Vergleiche der Stichproben aus den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 bzw. der Stichproben von den Untersuchungszeitpunkten Schossen und Blüte 2005 und 2006 an den Monitoringpunkten der Versuchsschläge .....	53
Tab. 4.4: Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests für die Vergleiche der Stichproben von den verschiedenen Monitoringpunkten der Versuchsschläge in den Jahren 2005 und 2006.....	54
Tab. 4.5: Prozentuale Anteile der Wurzeln im Ober- und Unterboden an den unterschiedlichen Monitoringpunkten der Versuchsschläge Rabenberg und Finkenherd.....	56
Tab. 5.1: Deskriptive Statistik für die Wurzellängendichte auf dem Versuchsschlag Rabenberg und Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und simulierten Werten in den beiden Versuchsjahren 2005 und 2006 sowie für beide Jahre zusammen .....	75
Tab. 5.2: Deskriptive Statistik für die Wurzellängendichte auf dem Versuchsschlag Finkenherd und Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und simulierten Werten in den beiden Versuchsjahren 2005 und 2006 sowie für beide Jahre zusammen .....	77
Tab. 5.3: Deskriptive Statistik für den Bodenwassergehalt auf dem Versuchsschlag Rabenberg und Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und simulierten Werten in den beiden Versuchsjahren 2005 und 2006 sowie für beide Jahre zusammen .....	79
Tab. 5.4: Deskriptive Statistik für den Bodenwassergehalt auf dem Versuchsschlag Finkenherd und Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und simulierten Werten in den beiden Versuchsjahren 2005 und 2006 sowie für beide Jahre zusammen .....	79
Tab. 5.5: Varianz, Variationskoeffizient und Standardabweichung der zeitlich hoch aufgelöst gemessenen und simulierten Bodenwassergehalte an ausgewählten Messpunkten der Versuchsschläge Rabenberg und Finkenherd.....	85
Tab. 5.6: Sensitivität der Bodenwassergehaltssimulation in Bezug auf Änderungen in den Niederschlagsmengen.....	86
Tab. 5.7: Sensitivität der Wurzellängendichtesimulation in Bezug auf Änderungen in den Niederschlagsmengen.....	87
Tab. 6.1: Attribute der Trainingsareale für den Versuchsschlag Rabenberg .....	98
Tab. 6.2: Bedeutung der Wasserstatusklassen .....	98
Tab. 6.3: <i>A priori</i> -Wahrscheinlichkeiten für die Trainingsareale <i>a</i> bis <i>i</i> .....	98
Tab. 6.4: Übereinstimmung der Modellergebnisse mit Ergebnissen von Feldaufnahmen ....	108



# **1 Allgemeine Einleitung**





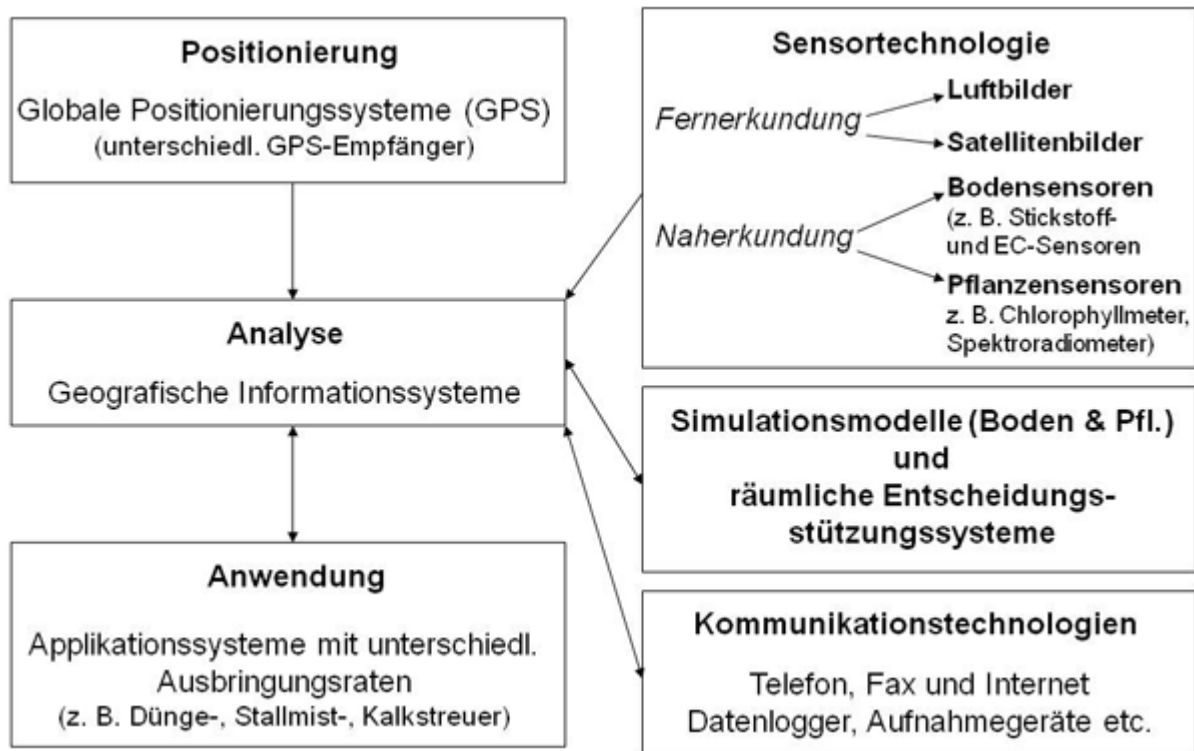
Aufgrund verschiedener Einflüsse findet die Präzisionslandwirtschaft (Precision Agriculture) immer mehr Eingang in die landwirtschaftliche Praxis. Die Herausforderungen an die Landnutzung durch den globalen Klimawandel und die Verknappung der natürlichen Ressourcen sowie eine weltweit steigende Nachfrage nach Lebensmitteln sind nur einige dieser Einflussfaktoren (WERNER, DREGER, SCHWARZ 2008). Seit Mitte der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts zieht Precision Agriculture (PA) weltweit Aufmerksamkeit auf sich und ließ das Forschungsinteresse schnell wachsen (LAMP 1987; ROBERT, ANDERSON 1987; SRINIVASAN 2006). PA nutzt den Fortschritt in der Informationstechnologie (wie z. B. Datenerhebung, Datenverarbeitung und Datenaufbereitung), mit deren Potenzial die landwirtschaftliche Produktion ökonomisch wie auch ökologisch effizienter gestaltet werden kann (NATIONAL RESEARCH COUNCIL 1997). PA kann daher als Konzept angesehen werden, das Bestrebungen in Richtung ganzheitlicher Produktion und Umweltmanagement realisiert (FLORIN 2007). Unter dem Begriff Precision Agriculture werden üblicherweise alle präzisionslandwirtschaftlich betriebenen Teilbereiche der Landwirtschaft, wie beispielsweise Precision Farming (PF), Precision Livestock Farming, Precision Viticulture, Precision Horticulture oder Precision Irrigation, zusammengefasst. PF steht dabei als Sammelbegriff für Produktionstechniken im Pflanzenbau, die intensiv und umfassend spezifische Standort- und Bestandesdaten nutzen, für die durch Sensoren, Ortungstechniken und spezielle Erhebungen zeitlich und räumlich hoch aufgelöste Informationen über Boden und Pflanzenbestand geliefert werden müssen (WERNER, DREGER, SCHWARZ 2008). Die „informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung“ ist Forschungsgegenstand des von 2005 bis 2008 laufenden Verbundforschungsprojektes *preagro II* gewesen. Ziel dieses Projektes war unter anderem, spezielle Lösungen zu wichtigen Problemen der Standort- und Bestandesanalyse für den Einsatz von PF in der landwirtschaftlichen Produktion zu liefern. Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des Teilprojektes 16, das sich mit der Methodenentwicklung zur flächenhaften Analyse und Modellierung von Wurzelwachstum unter Berücksichtigung des Boden- und Pflanzenwasserhaushalts befasste.

Durch die Anpassung des Managements an die hohe räumliche und zeitliche Variabilität von Boden und Pflanzenbeständen, deren Verwirklichung besonders durch den Einsatz von PA- bzw. PF-Techniken möglich ist, werden nicht nur ökonomische und ökologische Kosten der Produktion gesenkt sondern auch die Produktivität gesteigert. Für die Optimierung von

Produktivität und Wirtschaftlichkeit müssen nach (SRINIVASAN 2006) drei Basiskriterien erfüllt werden:

1. die Möglichkeit, jeden Punkt auf einem Schlag (über Geokoordinaten) zu identifizieren
2. die Möglichkeit, Daten auf angemessener Skala und in entsprechender Häufigkeit zu erfassen, zu interpretieren und zu analysieren
3. die Möglichkeit, Aufwandmengen und Bewirtschaftungspraktiken anzupassen, um die Leistung jedes Standortes zu maximieren.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen werden verschiedene Hilfsmittel wie z. B. globale Positionierungssysteme (GPS), geografische Informationssysteme (GIS) und relationale Datenbanken in Verbindung mit räumlich-attributiven Vorinformationen als Grundlage für Entscheidungsfindungssysteme (DSS; Decision Support System) genutzt (HERBST 2002) (Abb. 1.1). Die Qualität der Anpassung an die Variabilität von Boden und Pflanzenbeständen hängt dabei in hohem Maße von Qualität und Quantität der bereitgestellten Daten ab: je hoch auflösender hochqualitative Daten vorliegen, desto genauer kann die existierende Heterogenität von Boden und Pflanzenbeständen erfasst werden, so dass die Anpassung des Managements umso besser erfolgen kann. Für die Erfassung der erforderlichen Standort- und Bestandesdaten in der nötigen räumlichen und zeitlichen Auflösung sowie für eine Extrapolation der Daten in unbeprobte Flächen bzw. die Interpolation zwischen beprobten Arealen sind Probenahmedistanzen erforderlich, die in der Regel mit einem extrem hohen zeitlichen, finanziellen und auch personellen Aufwand verbunden sind (vgl. FROGBROOCK U. A. 1999; HERBST, LAMP 2004; MCBRATNEY 2003; MCBRATNEY, PRINGLE 1997; VIERA 1999). Daher sind sowohl Methoden für eine möglichst einfache und schnelle Erfassung von räumlich hochauflösenden Daten als auch effiziente entscheidungs-unterstützende Tools zur Datenanalyse notwendig, für die häufig die Fusion von erhobenen Daten erforderlich wird. Zur Multidatenfusion und Datenauswertung existieren neben zahlreichen anderen Verfahren so genannte Klassifizierungsmethoden (vgl. BEHRENS U. A. 2005; BEHRENS, SCHOLTEN 2005; GORDON, SHORTCLIFFE 1985; SOMMER U. A. 2003; SRINIVASAN, RICHARDS 1990; VAN MEIRVENNE, COCKX, VITHARANA 2005), die insbesondere zur Unterscheidung nicht-metrischer komplexer Strukturen und Muster, wie sie z. B. häufig im Zusammenhang mit Boden und seinen Eigenschaften auftreten, nützlich sind. Die so genannten weichen Klassifizierungsmethoden, zu denen auch die Dempster-Shafer-Theorie - eine Erweiterung der Bayesschen Wahrscheinlichkeitstheorie - zählt, verzichten darauf, definitive Aussagen über das Zutreffen einer Hypothese zu treffen. Stattdessen wird ein Vertrauensintervall für das



**Abb. 1.1: Hilfsmittel zur Umsetzung von Precision Agriculture (nach SRINIVASAN 2006 )**

Zutreffen einer Hypothese angegeben (vgl. LEIN 2003). Der Vorteil der Dempster-Shafer-Theorie im Vergleich zu anderen weichen Klassifizierungen, wie z. B. der Fuzzy Logic, besteht zum einen darin, dass bei Zunahmen der Evidenzen die Hypothesenmenge auf eine kleinere Anzahl eingegrenzt werden kann (SHAFER 1976). Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit, menschliche Beurteilung in Form von Experten-wissen in den Klassifizierungsprozess einfließen lassen zu können (FOODY 1999). Durch diese Kombination von subjektiven und technischen Beurteilungen, das heißt durch Anwendung semiquantitativer Methoden, wird es möglich, die Unsicherheit bei der Klassifizierung besser auszudrücken und die Qualität der Ergebnisse zu erhöhen (vgl. LEIN 2003).

Eines der Ziele dieser Arbeit bestand darin, auf Basis der Dempster-Shafer-Theorie ein GIS-basiertes Modell zu entwickeln, das in der Lage ist, hochauflösende Informationen über das Auftreten von (physikalischen) Bodeninformationen für eine Anpassung des Managements und für die Modellierung zur Verfügung zu stellen.

Die Wasserverfügbarkeit beeinflusst zahlreiche pflanzenphysiologische Prozesse und ist daher der entscheidende Faktor bezüglich des Wachstums und der Ertragsbildung von Weizen (ATWELL, KRIEDEMANN, TURNBULL 1999; HAY 1999) bzw. von Nutzpflanzen im Allgemeinen. Sie wird sich zukünftig aufgrund des Klimawandels weltweit ändern. Bezogen auf Deutschland werden diesbezüglich laut zweier Studien des Potsdam-Institutes für Klimafolgenforschung (PIK) (ZEBISCH U. A. 2005; WECHSUNG U. A. 2008) insbesondere in

großen Teilen Ostdeutschlands negative Änderungen auftreten. Da Pflanzenbestände hoch adaptive Systeme sind, ist die Anpassung der Bestandesführung an die Variabilität der Bodenwasserverfügbarkeit und des Klimas schwierig. Aufgrund ihres Potenzials, die komplexen Reaktionen der Pflanzen auf Änderungen in ihrer physikalischen, chemischen und biologischen Umwelt widerzuspiegeln (WALLACH, MAKOWSKI, JONES 2006), können Pflanzenwachstums- und Ertragssimulationsmodelle als Vorhersage- und Entscheidungsinstrumente genutzt werden, um das Bestandesmanagement zu optimieren und an diese schwankenden Bedingungen anzupassen. Sie können daher - wie aus Abb. 1.1 ersichtlich ist - geeignete Hilfsmittel zur Umsetzung von PA bzw. PF darstellen. Weiterhin können sie dazu verwendet werden, z. B. die Ertragsvariabilität zu charakterisieren und so die Produktion zu optimieren (FLORIN 2007) und bieten die Möglichkeiten, den Grad der Nachhaltigkeit von Bewirtschaftungssystemen zu messen, Zukunftstrends aufzuzeigen oder brauchbare Maßnahmen zur Minimierung der Umweltbelastung zu bestimmen (SRINIVASAN 2006). Da das Verständnis von raum-zeitlichen Boden- und Pflanzeninformationen Voraussetzung für die Effektivität von PA ist, ist eine Definition der Erwartungen an die Ergebnisse von Decision Support Systemen sehr wichtig (FLORIN 2007).

Ebenso wie die Qualität der Anpassung von Bewirtschaftungsmaßnahmen an die Variabilität von Boden und Pflanzenbeständen hängt die Qualität der Ergebnisse von Pflanzenwachstums- und Ertragssimulationsmodellen - neben der Modellqualität - von Qualität und Quantität der bereitgestellten Daten ab (vgl. HUNT, BOOTE 1998): mit steigender Auflösung und Qualität der Inputdaten steigt auch die Genauigkeit der Erfassung existierender Heterogenitäten von Boden und Pflanzenbeständen, so dass die Simulationsergebnisse eines Modells - in Abhängigkeit von dessen Fehlerkomponenten bis zu einem gewissen Grad - umso besser an die Realität angenähert werden können.

Das Pflanzenwachstumsmodell CERES-Wheat ist eine Modellkomponente des Decision Support System for Agricultural Technologie Transfer (DSSAT), das entwickelt wurde, um Managemententscheidungen in der landwirtschaftlichen Praxis zu unterstützen (TSUJI, HOOGENBOOM, THORNTON 1998; JONES U. A. 2003b). CERES zählt zu den prozessorientierten Modellen, die die Effekte von temporalen und multiplen Stressinteraktionen auf das Pflanzenwachstum unter verschiedenen Umwelt- und Managementbedingungen berechnen (BASSO U. A. 2001). Dauer des Wachstums, Biomasseakkumulation, Sink-Source-Verteilung und Ertrag werden in CERES-Wheat basierend auf einem empirischen Konzept simuliert (RITCHIE, GODWIN, OTTER-NACKE 1988). In unterschiedlichen Studien (z.B. HEINEMANN, HOOGENBOOM, CHOJNICKI 2002; LANGENSIEPEN U. A. 2008; SARKAR, KAR 2008) wurde

gezeigt, dass die Niederschlagsvariabilität großen Einfluss auf die Vorhersagequalität des Modells hat. Die Variabilität der Niederschläge wirkt auf die Berechnung der Bodenwasserverteilung, der Wurzellängendichte und der Reaktion der Pflanze auf Wasserstress (RITCHIE U. A. 1998). Das Ausmaß dieser Stressreaktion ist wiederum abhängig von Änderungen in den berechneten Wurzellängendichten, die in dem CERES Modell mit der simulierten Bodenwasserverteilung korreliert wurden (RITCHIE, GODWIN, OTTER-NACKE 1988). Da die Variabilität der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften innerhalb eines Schläges maßgeblichen Einfluss auf die Vorhersage des Modells von Biomasse und Ertrag hat, sind eine hohe Vorhersagequalität und genaue, hoch qualitative Eingangsdaten wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung des Modells. Um vor allem im Zusammenhang mit Präzisionslandwirtschaft das nützliche Potenzial von Modellen als Entscheidungsunterstützungssysteme vollständig ausschöpfen zu können, müssen diese beiden Voraussetzungen erfüllt sein.

Da Wurzelwachstum in starkem Maße die Rate bestimmt, mit der Pflanzen Bodenressourcen für Wachstum und Ertrag nutzen (LAMBERS, CHAPIN, PONS 2008), ist eine Validation der Berechnung der Bodenwasserverteilung sowie der Effekte der Wasserverteilung auf die Simulation der Wurzellängendichten erforderlich, um die Vorhersagequalität von CERES-Wheat zu prüfen.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit bestand aus diesem Grunde darin, die Wurzel- und Bodenwasserroutine des Modells CERES-Wheat durch die Analyse von Effekten standortspezifischer und zeitlicher Änderungen des Bodenwassergehaltes auf die Simulation des Wurzelwachstums zu validieren.

Die Charakteristika von Wurzelsystemen hängen von der Heredität ab, können aber durch Umweltfaktoren wie beispielsweise Textur, Tiefe, Wassergehalt, Mineralogie, Chemie und Belüftung des Bodens sowie Konzentration an gelösten Stoffen verändert werden (KRAMER, BOYER 1995). Die Rate des Bodenaufschlusses durch Wurzeln wird in erster Linie vom physiologischen Zustand der Pflanze und von Bodenbedingungen, insbesondere von Durchdringungswiderstand sowie Bodentemperatur und -feuchte, gesteuert (KLEPPER 1992). Die Reaktion von Pflanzen auf Wasserstress ist dabei unterschiedlich und abhängig vom Zeitpunkt seines Auftretens, seiner Dauer und seines Ausmaßes (HSIAO, BRADFORD 1983). Zusammenhänge zwischen dem Effekt von Wassermangel bzw. von Änderungen des Bodenwasserstatus auf das Wurzelwachstum von Pflanzen und deren Wasseraufnahme können immer noch nicht hinreichend genau quantifiziert werden und sind daher weiterhin Gegenstand umfangreicher Untersuchungen (z. B. ASSENG U. A. 1998; CHAUDHARY,

BHATNAGAR 1980; MEYER U. A. 1990; SHARMA, GHILDYAL 1977; WEIR, BARRACLOUGH 1986). So stellte z. B. KLIMANEK 1987 fest, dass kurzzeitiges Wasserdefizit zu einer Stagnation des Wurzelwachstums mit direkten Konsequenzen für Sprosswachstum und Ertrag führen kann, und SCHROETTER, ROGASIK, SCHNUG 2006 berichten von einer Förderung des Wurzelwachstums in tieferen Bodenschichten bei anhaltend niedriger Wasserversorgung. Hieraus ergibt sich die Frage nach der Menge an pflanzenverfügbarem Bodenwasser, die in Abhängigkeit von Boden- und Pflanzencharakteristika variiert. Humusgehalt, Bodentextur, -struktur, -schichtung und -chemie bzw. Pflanzenart, Wurzelcharakteristika, -verteilung oder -tiefe sowie Entwicklungsstadium sind nur einige der Einflussfaktoren (TOLK 2003), die räumlich (und zeitlich) hoch variabel sind.

Die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen wird neben deren Verfügbarkeit durch das Aufnahmevermögen der Pflanzen bestimmt (REUTER 2006), das von morphologischen, anatomischen und physiologischen Eigenschaften und Charakteristika der Wurzeln abhängt (BULJOVICIC, ENGELS 2001). Zu den morphologischen Eigenschaften zählt auch die Wurzellängendichte, die die Größe der Austauschfläche zwischen Wurzeln und Boden beeinflusst (REUTER 2006). Wurzelwachstum bestimmt in starkem Maße, wie Wasser und Nährstoffe für das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung genutzt werden (LAMBERS, CHAPIN, PONS 2008) und kann daher weit reichende Konsequenzen für die landwirtschaftliche Praxis haben.

Aufgrund dessen bestand ein Ziel dieser Arbeit darin, das Wurzelwachstum von Winterweizen an zwei unterschiedlichen Standorten in Deutschland unter Berücksichtigung der Einflüsse unterschiedlicher Bodenwasserstati und Bodeneigenschaften zu untersuchen. Die in diesem Rahmen erhobenen Wurzel- und Bodenwasserdaten dienten gleichzeitig zur Validation der Wurzel- und Bodenwasseroutine des Modells CERES-Wheat.

Zur Bestimmung der Wurzellänge bzw. der Wurzellängendichte existieren zahlreiche unterschiedliche Messmethoden. Zum einen besteht die Möglichkeit der Bestimmung durch vorwiegend früher eingesetzte manuelle und daher sehr zeitintensive linearen Messungen (BÖHM 1979) oder Linien-Intersektions-Techniken (NEWMAN 1966; TENNANT 1975), zum anderen durch heutzutage überwiegend angewandte unterschiedliche Bildanalysesysteme, mit deren Hilfe die Wurzellänge aus Wurzelbildern abgeleitet wird (z. B. BAUHUS, MESSIER 1999; DOWDY, NATER, DOLAN 1995; HIMMELBAUER, LOISKANDL, KASTANEK 2004; KASPAR, EWING 1997; RICHNER U. A. 2000; SMIT U. A. 2000; SMUCKER U. A. 1987; VAMERALI U. A. 2003). Aus Kostengründen wurde im Rahmen dieser Arbeit für die Bestimmung der Wurzellängendichte keines der bereits auf dem Markt erhältlichen Softwarepakete - die meistens die Bestimmung

zusätzlicher Wurzelparameter wie beispielsweise Durchmesser, Volumen oder Architektur beinhalten - angeschafft und verwendet. Stattdessen wurde ein eigenes halbautomatisches Verfahren unter Verwendung der schon vorhandenen und in vielen Bereichen der Wissenschaft und des Ingenieurwesens angewandten Software MATLAB entwickelt, mit der das in diesem Falle ausschlaggebende Merkmal Wurzellängendichte bestimmt wurde.

Die vorliegende Arbeit besteht neben der Beschreibung der Untersuchungsgebiete im Wesentlichen aus vier Teilen. Im *ersten Teil* (Kapitel 3) wird die Entwicklung und Anwendung einer Methode zur Bestimmung der Wurzellängendichte vorgestellt.

Da Wurzellängendichte bzw. Wurzelwachstum, Bodenwasser und Bodeneigenschaften sowohl zueinander als auch zum gesamten Pflanzenwachstum in engem Wechselspiel stehen und räumlich wie zeitlich hoch variabel sind, werden in Kapitel 4, dem *zweiten Abschnitt* der Arbeit, die Ergebnisse der Untersuchung des Wurzelwachstums von Winterweizen an zwei unterschiedlichen Standorten unter Berücksichtigung der Einflüsse unterschiedlicher Bodenwasserstati und Bodeneigenschaften dargestellt und diskutiert.

Der *dritte Teil* der Arbeit (Kapitel 5) befasst sich mit der Validation der Wurzel- und Bodenwasseroutine des Modells CERES-Wheat, die aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge zwischen Wurzelwachstum, Bodenwasser und Gesamtpflanzenwachstum erforderlich schien. Bei Anwendung der punktbasierten Modelle der DSSAT-Familie ist eine hohe Anzahl an Punktsimulationen Voraussetzung für eine adäquate Abbildung der standörtlichen Variabilität. Um den zeitlichen und personellen Aufwand, der mit einer großen Zahl an Monitoringpunkten einhergeht, möglichst gering zu halten, müssen Verfahren genutzt werden, die in der Lage sind, die nötigen Informationen hoch auflösend zur Verfügung zu stellen.

Daher befasst sich Kapitel 6, der *vierte Abschnitt* der Arbeit, mit einem methodischen Vorschlag für ein GIS-basiertes Modell, das unter Nutzung von Bodenleitfähigkeitsdaten sowie Informationen zu Textur, Bodentyp und Wasserstatus in der Lage ist, hochauflösende Bodeninformationen zur Verfügung zu stellen.

Zu den einzelnen Teilen ergaben sich spezifischen Fragen, aus denen Hypothesen für die vorliegende Arbeit abgeleitet wurden:

1. Wie wirken sich die unterschiedlichen Standortbedingungen (z. B. Bodeneigenschaften oder Witterungsverhältnisse) und damit auch unterschiedlichen Wachstumsbedingungen auf die Durchwurzelung an den beiden Versuchsstandorten aus?

**Hypothese:** Die in der Literatur zu findenden Angaben bezüglich der Einflüsse verschiedener Standortbedingungen auf das Wurzelsystem von Nutzpflanzen (z. B. Bodenwasserstatus und Bodendichte) lassen sich für die Versuchsstandorte Groß Twülpstedt und Wulfen generalisieren.

Wurzelwachstum und Bodenwasser sind räumlich wie zeitlich hoch variabel und stehen sowohl zueinander als auch zum gesamten Pflanzenwachstum in engem Wechselspiel. Die Reaktion von Pflanzen auf diese Variabilität kann potenziell mit Hilfe von Pflanzenwachstumsmodellen berechnet werden.

2. Wie gut ist die Berechnungsgenauigkeit des Modells CERES-Wheat unter den klimatischen Bedingungen der beiden Versuchsstandorte bezüglich Wurzelwachstum und Bodenwasser? Werden standörtliche Unterschiede und zeitliche Veränderungen von Wurzelwachstum und Bodenwasser durch das Modell ausreichend abgebildet?

**Hypothese:** Standörtliche und zeitliche Variabilität von Wurzelwachstum und Bodenwasser können mit dem Modell CERES-Wheat im Rahmen von Präzisionslandwirtschaft ausreichend abgebildet werden.

Da die im vorliegenden Fall verwendeten, regionalisierten Klimadaten auf interpolierten Werten verschiedener Wetterstationen der entsprechenden Region basieren, stellen sie zwangsläufig eine Unsicherheit bezüglich der Simulationen dar und müssen kritisch betrachtet werden.

3. Wie wirken sich Fehler bzw. Unsicherheiten der generell kleinräumig stark schwankenden und in diesem Falle regionalisierten Klimadaten auf die Modellsimulationen aus?

**Hypothese:** Änderungen in den Niederschlagsmengen haben einen deutlichen Effekt auf die Modellsimulationen bezüglich Bodenwassergehalt und Wurzellängendichte, der sich in erkennbaren Änderungen der simulierten Variablen und deren Fehler zeigt.

Die Anpassung von Bewirtschaftungsmaßnahmen an die Variabilität von Boden und Pflanzenbeständen sowie die Ergebnisse von Pflanzenwachstums- und Ertragssimulationsmodellen hängen von Qualität und Quantität der bereitgestellten Daten ab.



4. Wie und auf Grundlage welcher Daten können die für eine Anpassung des Managements und für die Modellierung notwendigen räumlich hoch aufgelösten Bodeninformationen mit möglichst geringem zeitlichen, personellen und finanziellen Aufwand zur Verfügung gestellt werden?

**Hypothese:** Mit einem Klassifikationsmodell auf Basis der Dempster-Shafer-Theorie können nicht-metrische und komplexe Bodeninformationen unter relativ geringem zeitlichen, personellen und finanziellen Aufwand hoch aufgelöst dargestellt werden.



## **2 Untersuchungsgebiete**



## 2.1 Übersicht und Lage

Die untersuchten Flächen gehören zu den Betrieben WIMEX in Sachsen-Anhalt und Täger Farny in Niedersachsen, die beide Versuchsbetriebe des Forschungsverbundprojektes preagro II waren.

Der Versuchsschlag Finkenherd (40 ha; Abb. 2.1) des Betriebes WIMEX liegt in der Nähe von Wulfen ca. 25 km westlich von Dessau ( $51^{\circ} 79' \text{ N}$ ,  $11^{\circ} 92' \text{ O}$ , ca. 70 m über NN) im Trockengebiet der Sandlöss- und Lössbörden von Sachsen-Anhalt (HERBST 2002). Typische Böden für diese Region sind Schwarzerden mit unterschiedlich mächtigen Sandlössauflagen über Sanden, Kiesen oder Geschiebe (HERBST 2002).

Der Versuchsschlag Rabenberg (7 ha; Abb. 2.1) des Betriebes Täger-Farny liegt bei Querenhorst ca. 20 km süd-östlich von Wolfsburg ( $52^{\circ} 34' \text{ N}$ ,  $10^{\circ} 97' \text{ O}$ , ca. 105 m über NN). Die Region ist durch Verwitterungs- und Glazialdecken über Juratonstein und Altmoränensedimenten geprägt (HERBST 2002). Pelosole und Pseudogleye sind typische Böden dieser Region (HERBST 2002).

## 2.2 Klima

Die Klimadaten für die beiden Untersuchungsgebiete stammen aus der MARS-Datenbasis des Joint Research Centre der Europäischen Kommission (JRC; <http://mars.jrc.it/>). MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing) bietet regionalisierte Wetterdaten an, die auf interpolierten Daten von Wetterstationen europäischer Regionen basieren. Da beispielsweise die Niederschlagsereignisse besonders in der Region Groß Twülpstedt deutlichen kleinräumigen Schwankungen unterliegen (pers. Mitteilg. J. Kohl, Mitarbeiter des Betriebes Täger-Farny), können die MARS-Daten nur einen Überblick über die tatsächlich vorherrschenden Verhältnisse auf den Betrieben geben.

### 2.2.1 Wulfen

Das Untersuchungsgebiet Wulfen liegt im Trockengebiet des Regenschattens der Harzberge. Die durchschnittliche minimale Tagestemperatur beträgt  $5.6^{\circ}\text{C}$  und die durchschnittliche maximale Tagestemperatur  $13.8^{\circ}\text{C}$ . Der mittlere Jahresniederschlag beläuft sich auf 504 mm (langjährige Mittel (1975 - 2006) der MARS-Daten).

Die Monatssummen der Niederschläge, der potenziellen Evapotranspiration und der klimatischen Wasserbilanz für den Untersuchungszeitraum sind in Abb. 2.2 dargestellt.

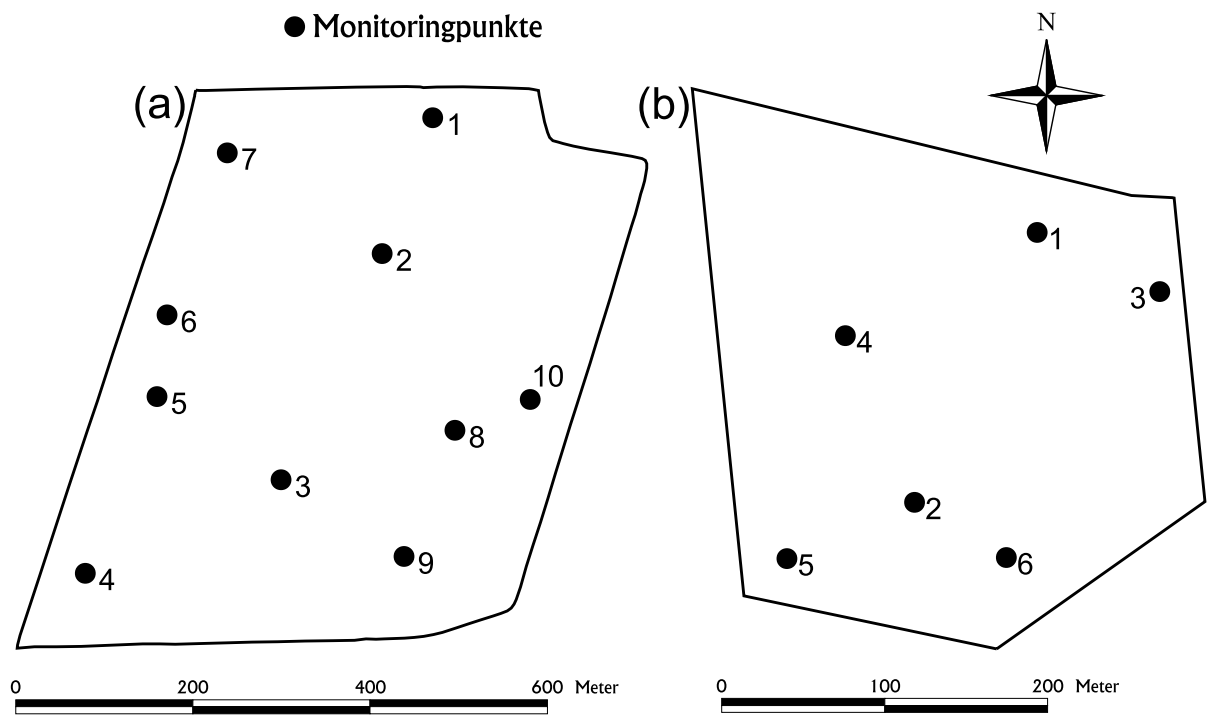


Abb. 2.1: Versuchsschläge Finkenherd (a) und Rabenberg (b)

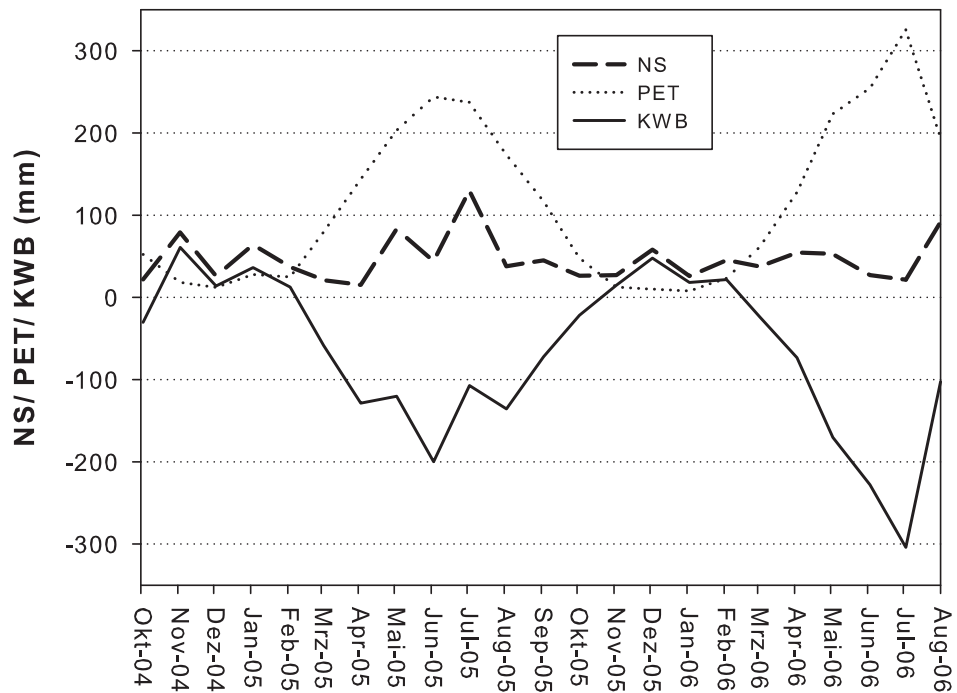
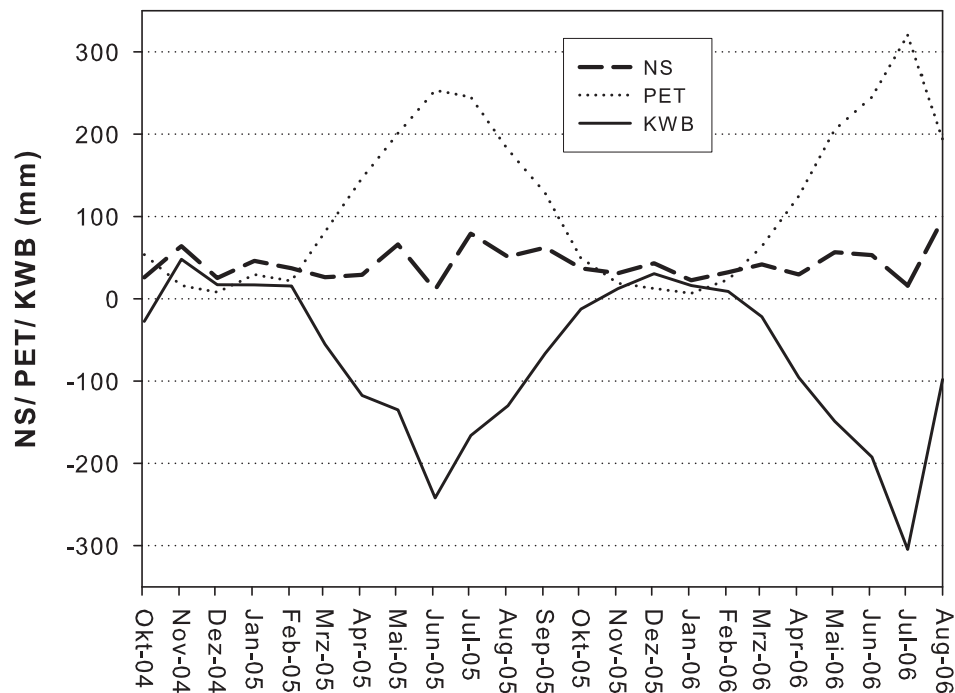


Abb. 2.2: Niederschlag (NS), potenzielle Evapotranspiration (PET) und klimatische Wasserbilanz (KWB) (jeweils Monatssummen) für die Region Wulfen, Sachsen-Anhalt



**Abb. 2.3: Niederschlag (NS), potenzielle Evapotranspiration (PET) und klimatische Wasserbilanz (KWB) (jeweils Monatssummen) für die Region Groß Twülpstedt, Niedersachsen**

Hieraus kann entnommen werden, dass ab Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr bis zur Ernte gewöhnlich ein starkes andauerndes Wasserdefizit herrscht. Dieses Defizit betrug im Jahr 2005 durchschnittlich ca. 125 mm und im Jahr 2006 ca. 150 mm. Die Pflanzen müssen daher im Verlauf der Vegetationsperiode auf die Bodenwasserreserven zurückgreifen, die für diese Region eine große Rolle spielen.

## 2.2.2 Groß Twülpstedt

Das Untersuchungsgebiet Groß Twülpstedt wird durch ein gemäßigt kontinentales Klima beeinflusst. Die durchschnittliche minimale Tagestemperatur beträgt 5.5°C, die durchschnittliche maximale Tagestemperatur 13.3°C. Die mittleren Jahresniederschläge betragen 608 mm (langjährige Mittel (1975 - 2006) der MARS-Daten).

Aus Abb. 2.3 ist ersichtlich, dass auch an diesem Standort von Beginn der Vegetationsperiode im Frühjahr bis zur Ernte ein andauerndes Wasserdefizit herrschte. Das Defizit betrug in beiden Versuchsjahren im Mittel ca. 140 mm und ist mit den Werten für den Standort Wulfen vergleichbar.

## **2.3 Geogenese und Relief**

### **2.3.1 Wulfen**

Der Versuchsschlag Finkenherd liegt im Sandlössgürtel des Saale-Elbe-Gebietes, das im Altquartär zu einem Akkumulationsgebiet für fluviatile Quarzschotter mit einem hohen Anteil an verwitterungsempfindlichen Gesteinen und Mineralien wurde (EIBMANN 1995). Für das Gebiet sind nach (EIBMANN 1995) sechs verschiedene diluviale Abschnitte zu unterscheiden: drei altquartäre und drei jeweils der Elster-, Saale- und Weichseleiszeit zugehörige Terrassen. Im Unterboden sind Grundmoränensedimente der Saalevereisung (Geschiebemergel) in kleinräumigem Wechsel mit Terrassensedimenten (saaleeiszeitliche Sande) zu finden. Die Sandlössaufwehungen stammen hauptsächlich aus verschiedenen Phasen des Weichselglazials, wobei jungweichseleiszeitliche Sandlössse das flächenhaft am weitesten verbreitete äolische Sediment sind (FIEDLER, HUNGER 1970).

Der Versuchsschlag fällt insgesamt von Süden nach Norden leicht ab und ist geprägt durch eine schwach hügelige Form mit leichten Erhebungen und Senken. Die durchschnittliche Höhe des Schlages liegt bei ca. 70 m über NN, die Hangneigung beträgt 0.7 %.

### **2.3.2 Groß Twülpstedt**

Der Versuchsschlag Rabenberg liegt in der Nähe von Groß Twülpstedt bei Querenhorst und Volkmarsdorf. Entsprechend den Erläuterungen zur geologischen Karte 1:25.000 (MESTWERDT 1914) stehen in diesem Gebiet die unterschiedlichsten geologischen Formationen bis an die Oberfläche an. Der Schlag ist geprägt durch Juratone, die von glazialen Deckschichten unterschiedlicher Mächtigkeit (60 - 120 cm) überdeckt sind und teilweise sogar bis an die Oberfläche anstehen (HERBST 2002). Diese Deckschichten bestehen aus saale- und weichseleiszeitlichen Grundmoränenablagerungen (Lehme und Sande).

Der Versuchsschlag fällt von Norden nach Süden deutlich ab. Die durchschnittliche Höhe des Schlages liegt bei ca. 105 m über NN, die Hangneigung beträgt 2.4 %.

## **2.4 Pedogenese und Bodenverbreitung**

### **2.4.1 Wulfen**

Die Böden am Standort Finkenherd sind geprägt durch unterschiedlich mächtige Sandlöss- und Lössauflagen (3 - 8 dm) über saaleeiszeitlichem Geschiebemergel und tertiären Sanden



und Kiesen (ALTERMANN 1995). Der Oberboden besteht flächendeckend aus sandig-schluffigen und schluffigen Substraten, im Unterboden sind die lehmigen Substrate des Geschiebemergels in kleinräumigem Wechsel mit saaleeiszeitlichen, sandigen Substraten zu finden. Der Schlag ist daher im Unterboden durch eine hohe Texturheterogenität geprägt.

Wesentliche, auf dem Schlag vorkommende Bodentypen sind Schwarzerden und Braunerde-Schwarzerden, die flächig auskartiert wurden (HERBST 2002). Vereinzelt treten im Norden des Schlages Gley-Schwarzerden und Gleye auf.

### **2.4.2 Groß Twülpstedt**

Auf dem Schlag Rabenberg bilden sehr unterschiedliche geologische Ausgangsmaterialien die Grundlage für die Bodenbildung. Saale- und weichseleiszeitliche Moränensande und Lehme unterschiedlicher Mächtigkeit (6 -12 dm) sind von Juratonen unterlagert, die vereinzelt aber auch bis an die Oberfläche anstehen (HERBST 2002). Die Böden des Schlages Rabenberg sind aufgrund dessen durch hohe Lagerungsdichten und Staunässe (HERBST 2002) sowie durch eine klare Strukturierung bezüglich der auftretenden Texturen geprägt. Wesentliche, flächig auftretende Bodentypen auf diesem Schlag sind Pseudogleye und deren Subtypen, wie beispielsweise Braunerde-Pseudogley.

Minimale und maximale Tagesmitteltemperaturen für die beiden Versuchsstandorte Groß Twülpstedt und Wulfen unterscheiden sich kaum. Ein deutlicher Unterschied besteht jedoch bezüglich des langjährigen mittleren Jahresniederschlages, der in der Region Groß Twülpstedt um ca. 100 mm höher liegt als in der Region Wulfen. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Standorten besteht jedoch in ihrer Geogenese und Pedogenese. Aufgrund der verschiedenen Ausgangsmaterialien entstanden völlig unterschiedliche Böden mit entsprechend unterschiedlichen Eigenschaften, die sich verschiedenartig auf das Pflanzenwachstum auswirken.



### **3 Bestimmung der Wurzellängendichte von Getreide unter Verwendung der MATLAB Image Processing Toolbox**



### 3.1 Einleitung

Das Wachstum und die räumliche Verteilung von Wurzeln im Boden haben starken Einfluss auf die Nutzung von Bodenressourcen durch Pflanzen (LAMBERS, CHAPIN, PONS 2008). Wurzelwachstum ist daher eine wichtige Zustandsvariable, die in Feldexperimenten und Modellierstudien eine herausragende Rolle spielt (z. B. JAMIESON U. A. 1998; MUSTERS, BOUTEN 2000; PRASAD 1988; VRUGT U. A. 2001; ZUO U. A. 2004). Früher wurden manuelle lineare Techniken (BÖHM, 1979) oder Linien-Intersektions-Techniken (NEWMAN 1966; TENNANT 1975) zur Messung von Wurzellängen genutzt, die sehr zeitintensiv sind. In neuer Zeit werden jedoch immer häufiger verschiedene Bildanalysesysteme verwendet, um die Wurzellänge aus Wurzelbildern abzuleiten (z. B. BAUHUS, MESSIER 1999; DOWDY, NATER, DOLAN 1995; HIMMELBAUER, LOISKANDL, KASTANEK 2004, KASPAR, EWING 1997; RICHNER U. A. 2000; SMITH, HAMEL 1999; SMUCKER U. A. 1987; VAMERALI U. A. 2003). Verglichen mit den früheren Methoden sind Bildanalysesysteme weniger zeitaufwändig, genauer und weniger anfällig für manuelle Fehler (RICHNER U. A. 2000). Die am häufigsten genutzten Geräte zur Erfassung von Bildern ausgewaschener Wurzeln sind elektronische Kameras oder Scanner (RICHNER U. A. 2000), die z. B. auf Glasplatten mit definierter Fläche und farblich einheitlichem Hintergrund ausgerichtet werden, um eine eindeutige Erkennung des Wurzelmaterials zu ermöglichen. Die Genauigkeit dieser Methodik ist dabei stark von der Bildauflösung und den Kontrasteinstellungen abhängig. Eine weitere wichtige Voraussetzung ist eine einheitliche Ausleuchtung der Scanfläche, da sonst ein negativer Effekt auf den Bildkontrast zu erwarten ist. Üblicherweise werden zur Erfassung von Wurzelbildern Standard Flachbettscanner genutzt, wozu die Wurzeln in flachen, transparenten Schalen ausgebreitet werden, die 2 - 4 mm hoch mit Wasser gefüllt sind (POLOMSKI, KUHN 2003; RICHNER U. A. 2000; SMIT U. A. 1994).

Für eine genaue Erkennung des Wurzelmaterials ist eine klare Zerlegung des Bildes in Vorder- und Hintergrund notwendig. Die am häufigsten angewandte Methode zur Segmentierung von Bildern ausgewaschener Wurzeln ist die Nutzung eines Grau-Level-Grenzwertes (RICHNER U. A. 2000). Zur Schätzung der Wurzellänge durch Bildanalysesysteme gibt es zwei Hauptansätze, die so genannten Linien-Intersektions- sowie Kettenmethoden. Im Falle der Linien-Intersektionsmethode wird die Wurzellänge über die Anzahl der Schnittpunkte von Wurzelpixeln mit Rasterlinien berechnet (TENNANT 1975). Kettenmethoden, die auf der Kettenkodierung nach (FREEMAN 1970) basieren, berechnen die Wurzellänge, indem die Längen der Pixel in einer Kette aufsummiert werden, wobei eine Längenkorrektur für

diagonal verbundene Pixel enthalten ist (KASPAR, EWING 1997). Die in dieser Arbeit verwendete Wurzellängendichte wurde aus der projizierten Wurzelfläche abgeleitet, die durch Aufsummierung aller Wurzelpixel in einem Bild berechnet wurde (RICHNER U. A. 2000). Existierende Software zur Wurzelanalyse beinhaltet meist die Bestimmung zusätzlicher Wurzelparameter wie Durchmesser, Volumen oder Architektur, sind jedoch in den meisten Fällen kostenpflichtig. Das wichtigste Merkmal, die Wurzellängendichte, kann mit kostengünstigen Standard Flachbettscannern und mit kosten- und lizenzfreier Bildanalysesoftware (siehe z. B. [www.scilab.org](http://www.scilab.org)) bestimmt werden. Für diese Arbeit wurde aus praktischen Erwägungen die vorhandene Software MATLAB verwendet. MATLAB ist eine weit verbreitete numerische Modellierungsumgebung, die in vielen Bereichen der Wissenschaft und des Ingenieurwesens angewandt wird. Die Image Processing Toolbox ist eine Sammlung von Funktionen, die die Leistung von MATLAB in Bezug auf Bildanalyse und Verbesserung der Bildqualität, Filterung, Erkennung von Morphologie und bestimmten Bildregionen sowie zahlreiche andere Operationen erweitert. Im Folgenden wird eine automatische Prozedur für die Verarbeitung großer Anzahlen von Wurzelbildern mit MATLAB beschrieben.

## 3.2 Material und Methoden

### 3.2.1 Probennahme und Probenaufbereitung

Die Wurzelproben wurden zu Beginn des Schossens (Dc 31 - 33, ZADOCKS, CHANG, KONZAK 1974 bzw. BBCH 31 - 33, MEIER 2001) und zu Beginn der Blüte (Dc 61 - 63/ BBCH 61 - 63) an den jeweiligen Monitoringpunkten auf den beiden Versuchsschlägen (Abb. 2.1) mit einem Hand-wurzelbohrer (2-teiliger Wurzelbohrer, Eijkelkamp) zufällig zwischen den Pflanzenreihen gezogen. Dabei wurden Bohrkerne mit definiertem Volumen (80 mm Durchmesser, 150 mm Länge) in 15 cm-Schritten mit drei Wiederholungen entnommen (für beide Versuchsstandorte insgesamt ca. 1100 Stück). Die maximalen Beprobungstiefen betrugen zum Schossen 0.9 m und zur Blüte 1.2 m. Bis zur weiteren Verarbeitung wurden die Proben bei -20°C tief gefroren. Um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Wurzeln innerhalb der Proben zu erhalten, wurden die Bohrkerne und die darin enthaltenen Wurzeln mit einer Schere gleichmäßig zerkleinert und homogenisiert. Aus dem homogenisierten Material wurde zufällig eine Unterprobe gezogen und abgewogen. Die Unterprobe wurde mit Wasser aufgegossen, die Suspension über einem 1mm-Sieb abgesehen und mit Wasser nachgespült. Die ausgewaschenen Bestandteile wurden vom Sieb in eine Schale gespült und die noch in der Probe befindlichen anorganischen und organischen Bodenbestandteile mit

einer Pinzette von den Wurzeln getrennt (vgl. Methode REUTER 2006). Aktive und inaktive Wurzeln wurden visuell unterschieden (SAVIN, HALL, SATORRE 1994). Die ausgewaschenen Wurzeln wurden bis zur Bestimmung der Wurzellängendichte mittels Bildanalyse im Kühlschrank in einer 15%igen Isopropanol-Lösung gelagert (KÜCKE, SCHMID, SPIESS 1995).

### 3.2.2 Bildanalyse

Die Wurzeln wurden in einer flachen, mit Wasser gefüllten Glasschale (2 - 4 mm Wassertiefe) ausgebreitet und, wie beispielsweise von SMIT U. A. 1994, RICHNER U. A. 2000, oder POLOMSKI, KUHN 2003 beschrieben, mit einem herkömmlichen Flachbettscanner (Mustek P3600 A3) im Grauskalenmodus (256 Grautöne) und mit einer Auflösung von 200 dpi eingescannt. Es wurde die niedrigste vertretbare Auflösung gewählt, bei der feine Wurzeln noch erkannt wurden und Bilder mit einer bearbeitbaren Größe in Bezug auf die Bearbeitungsdauer entstanden. Die Bilder wurden im nicht komprimierten Tagged Image File Format (TIF) gespeichert, um eine hohe Bildqualität zu erhalten. Proben, die sehr viele Wurzeln enthielten, wurden in zwei oder drei Unterproben geteilt, um Überlappung oder Aneinanderliegen von Wurzeln und damit Fehlschätzungen zu vermeiden. Um eine eindeutige Erkennung des Wurzelmaterials zu gewährleisten, war ein möglichst einheitlicher Bildhintergrund nötig. Zur Vermeidung von uneinheitlicher Beleuchtung oder Schattenwurf wurden die Proben während des Scanvorgangs zusätzlich von oben beleuchtet (BAUHUS, MESSIER 1999) (Abb. 3.1). Des Weiteren wurde ein höchst möglicher Kontrast zwischen Wurzeln und Bildhintergrund hergestellt, um auch eine eindeutige Erkennung von feinen Wurzeln zu gewährleisten.

Die TIF-Bilder wurden nach einem festgelegten Schema benannt, in einem Dateiverzeichnis gespeichert und dann darauf basierend automatisch mit der Image Processing Toolbox der MATLAB-Umgebung (Vers. 7.1) weiterverarbeitet. Zu diesem Zweck wurde ein Skript geschrieben, das automatisch ein vorgegebenes Dateiverzeichnis durchläuft, jedes Bild zur späteren Analyse vorbereitet, die Wurzelfläche berechnet und diese dann zusammen mit dem Dateinamen herausgibt. Zunächst wurde mit der Image Processing Toolbox ein reines Hintergrundbild erstellt, indem der Farbwert der dunklen Hintergrundpixel geschätzt wurde und die hellen Wurzelpixel durch morphologische Strukturierung entfernt wurden. Durch Subtraktion des reinen Hintergrundbildes vom Originalbild wurde der Kontrast weiter verstärkt und der Hintergrund uniformiert. Über die automatische Kalkulation eines Grautonschwellenwertes wurde das Bild segmentiert und in ein Binärbild umgewandelt, auf



**Abb. 3.1: Aufbau der Scan-Apparatur**

dem die Hintergrundpixel schwarz und die Vordergrundpixel - in diesem Falle die Wurzeln - weiß erschienen. Die Wurzelfläche im Binärbild wurde durch Aufsummierung aller Wurzelpixel berechnet (vgl. RICHNER U. A. 2000) und in  $\text{cm}^2$  ausgegeben. Über einen gewichteten Wurzeldurchmesser, der aus der Häufigkeitsverteilung zufällig gemessener Wurzeldurchmesser ( $d_i$ ) aus allen Tiefenstufen ermittelt wurde, ist aus der Wurzelfläche ( $A$ ) die Wurzellänge ( $L$ ) jeder Probe berechnet worden:

$$L = \sum_i^n \frac{A}{d_i} * p \quad (3.1)$$

wobei  $p$  der prozentuale Anteil der Durchmesserklasse ist.

Über Gewicht und Volumen des Bohrkerns und Gewicht der Unterprobe wurde die Wurzellänge in Wurzellängendichte (cm Wurzeln je  $\text{cm}^3$  Boden) umgerechnet.

(SMIT U. A. 2000) warnen davor, dass die Wurzellänge mit Bildanalysetechniken stark unterschätzt werden kann, wenn die Gesamtlänge einer Probe 400 cm überschreitet. Basierend auf Daten von (PAN, BOLTON 1991) schlossen sie auch, dass die Unterschätzung der Wurzellänge verstärkt wird, wenn die Wurzeldichte auf der Scanfläche  $0.8 \text{ cm je cm}^2$  überschreitet. Andere Autoren empfehlen maximale Wurzeldichten zwischen  $1.5$  und  $3 \text{ cm je cm}^2$  Scanfläche (BAUHUS, MESSIER 1999; BOUMA, NIELSEN, KOUSTAAL 2000; HIMMELBAUER, LOISKANDL, KASTANEK 2004).



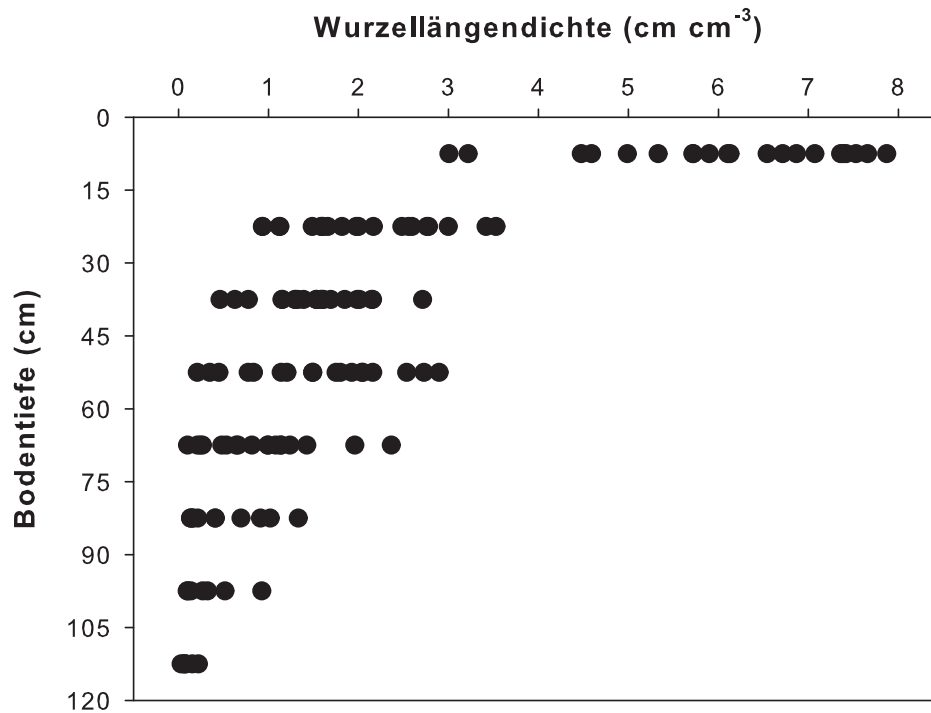


Abb. 3.2: Ergebnisse der Referenzmessungen mit der modifizierten Linien-Intersektionsmethode (n = 123)

Es wurde daher sichergestellt, dass die Gesamtwurzellängen und Wurzeldichten der analysierten Proben maximal 255 cm bzw. 0.5 cm/ cm<sup>2</sup> betrugen.

### 3.2.3 Referenzmessungen

Um die Qualität der Bildanalyseergebnisse zu validieren, wurde die modifizierte Linien-Intersektionsmethode (TENNANT 1975) angewandt. Hierzu wurden die Wurzellängen von 123 zufällig ausgewählten Proben aller Tiefenstufen (0 – 120 cm) von Hand bestimmt. Deren Wurzellängendichten variierten zwischen 0.3 und 8 cm cm<sup>-3</sup>. Die Wurzeln wurden in einer wassergefüllten Glasschale über einem Raster von 1 x 1 cm ausgebreitet und die Schnittpunkte der Wurzeln mit horizontalen und vertikalen Rasterlinien gezählt. Ein Wert von 1 wurde für Wurzeln, die eine Linie schnitten, und für Wurzelenden und gekrümmte Wurzelpartien, die eine Linie berührten, gezählt. Ein Wert von 2 wurde Wurzeln, die auf oder entlang einer Linie lagen, zugeordnet. Die Wurzellänge ( $L$ ) wurde über folgende Formel bestimmt:

$$L = \frac{\pi}{4} * n * u \quad (3.2)$$

wobei  $n$  die Anzahl der Schnittpunkte und  $u$  die Rasterweite in cm ist.

Die so ermittelten Wurzellängen wurden in Bezug zum Bodenvolumen gesetzt und in Wurzellängendichten umgerechnet. Abb. 3.2 zeigt die Ergebnisse der Referenzmessungen und deren Variabilität in den unterschiedlichen Bodentiefen. Die Qualität der Bildanalyseergebnisse wurde mit linearer Regression und Korrelation zwischen den Bildanalyseergebnissen und den Referenzmessungen überprüft und der mittlere quadratische Fehler (MSE) sowie die Wurzel aus diesem (RMSE) berechnet. Der MSE wurde außerdem in Bias (systematischer Fehler) und Varianz aufgeteilt, um zwischen den beiden Fehlerquellen unterscheiden zu können. Zur Bestimmung der Variation innerhalb der Proben wurde deskriptive Statistik angewandt.

### 3.2.4 Wurzeldurchmesser

Die Wurzellänge wurde durch Multiplikation der ermittelten Wurzelfläche mit einem gewichteten Wurzeldurchmesser errechnet (siehe Formel 3.1). Zunächst sollte ein Durchschnittsdurchmesser für alle Probenahmetiefen verwendet werden, wodurch jedoch die Wurzellängendichte (WLD), verglichen mit den Ergebnissen der Referenzmessungen, um ca. 17 % unterschätzt wurde. Daher wurden die Durchmesser zufällig ausgewählter Proben aus allen Beprobungstiefen gemessen ( $n = 146$ ) und aus der Häufigkeitsverteilung dieser gemessenen Wurzeldurchmesser ein gewichteter Durchmesser gebildet. Die resultierende Häufigkeitsverteilung ist in Abb. 3.3 dargestellt. Um den Einfluss des Wurzeldurchmessers (WD) auf die Ergebnisse zu verdeutlichen, wurden zwei weitere, zufällig generierte Häufigkeitsverteilungen (Abb. 3.4) sowie ein Durchschnittsdurchmesser mit der tatsächlichen Häufigkeitsverteilung der Wurzeldurchmesser verglichen.

## 3.3 Ergebnisse

Zur Quantifizierung der Schwankung der gemessenen Wurzellängendichten innerhalb der unterschiedlichen Bodentiefen wurde deskriptive Statistik angewandt. Die Wurzellängendichten nahmen von  $6.1 \text{ cm cm}^{-3}$  im Oberboden exponentiell auf  $0.1 \text{ cm cm}^{-3}$  im unteren Bereich der Wurzelzone ab. Standardabweichung und Varianz waren in der oberen Bodenschicht (0 - 15 cm) mit Werten von 1.41 bzw.  $1.97 \text{ cm cm}^{-3}$  am höchsten und nahmen ebenfalls in unteren Bodenschichten ab. In einer Tiefe von 105 - 120 cm betrugen sie nur noch 0.07 bzw.  $0.01 \text{ cm cm}^{-3}$ . Die Variationskoeffizienten in den unterschiedlichen Tiefenstufen bewegten sich zwischen 23 und 88 % (Tab. 3.1). Der Einfluss unterschiedlicher Wurzeldurchmesser sowie die Verwendung eines Durchschnittsdurchmessers auf die Ergebnisse der Bildanalyse wurden mit den 123 Referenzmessungen quantifiziert.

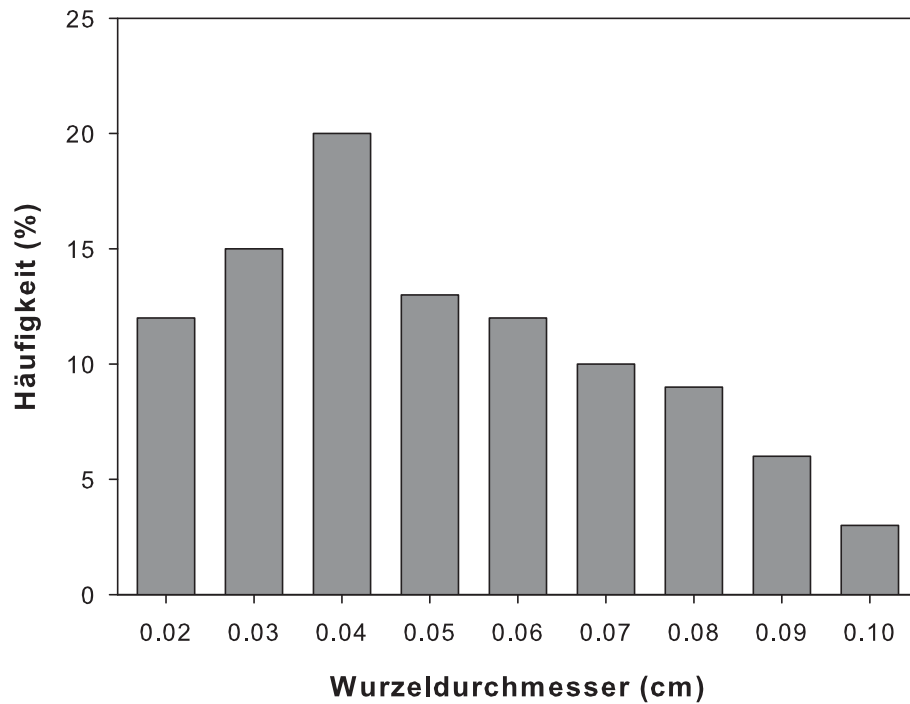


Abb. 3.3: Häufigkeitsverteilung der gemessenen Wurzeldurchmesser (n = 146)

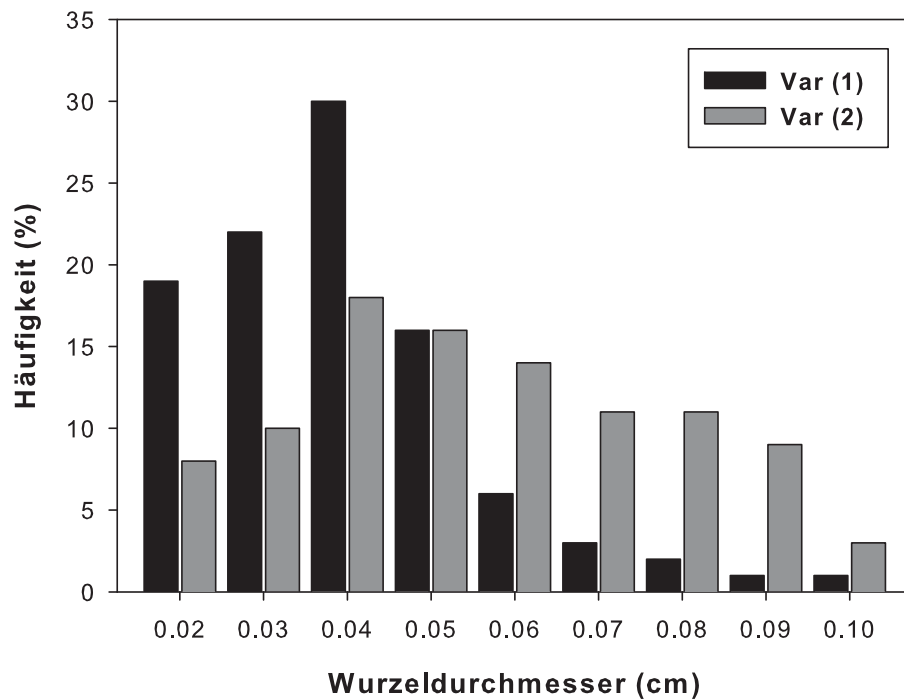


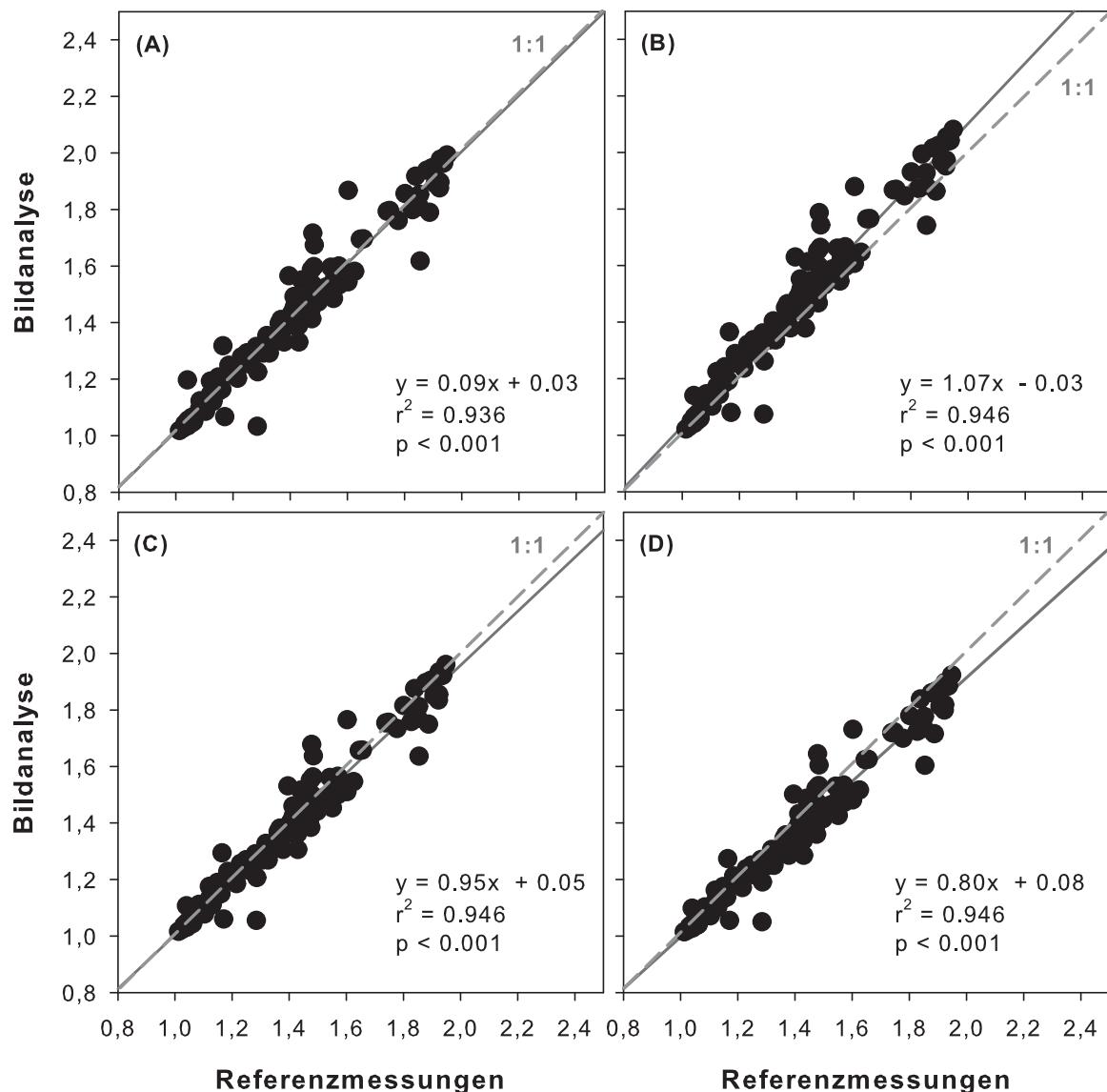
Abb. 3.4: Zwei willkürlich geänderte Verteilungen von Wurzeldurchmessern mit (1) erhöhter Häufigkeit niedriger und verringerter Häufigkeit höherer Durchmesser und mit (2) verringerter Häufigkeit niedriger und erhöhter Häufigkeit größerer Durchmesser

Unter Verwendung der experimentell bestimmten Durchmesser-Verteilung (Abb. 3.3; Tab. 3.2, Vert. 1) waren die Ergebnisse der Bildanalyse und die Referenzmessungen hoch korreliert ( $r^2 = 0.94$ , Abb. 3.5 a). Bias und RMSE für diese gemessene Häufigkeitsverteilung betrugen 0.01 bzw.  $2.18 \text{ cm cm}^{-3}$  und die Steigung der Regressionslinie betrug 1.01 (Abb. 3.5 a; Tab. 3.2, Vert. 2). Die Verwendung der beiden willkürlich geänderten Häufigkeitsverteilungen und des Durchschnittsdurchmessers führte sowohl zu höheren als auch zu niedrigeren Werten für RMSE und Bias. Eine Erhöhung der linken (0.2 - 0.4 mm) und eine Verringerung der rechten Häufigkeiten (0.5 - 1.0 mm) der in Abb. 3.3 dargestellten Häufigkeitsverteilung führte sowohl zu einem deutlich höheren RMSE und Bias als auch zu einer Überschätzung der Wurzellängendichte von ca. 7 % (Abb. 3.5 b und Tab. 3.2). RMSE und Bias erhöhten sich von 2.18 auf 2.27 bzw. von 0.01 auf  $0.35 \text{ cm cm}^{-3}$  (Tab. 3.2, Vert. 2). Bei Verringerung der linken (0.2 - 0.4 mm) und Erhöhung der rechten Häufigkeiten (0.5 - 1.0 mm) änderte sich der Bias nicht, die Wurzellängendichten wurden jedoch um ca. 5 % unterschätzt und der RMSE sank leicht auf  $1.96 \text{ cm cm}^{-3}$  (Abb. 3.5 c; Tab. 3.2, Vert. 3). Die Verwendung eines Durchschnittsdurchmessers führte zu ähnlichen Korrelationen zwischen den manuell gemessenen und automatisch bestimmten Wurzellängendichten, die jedoch erheblich um 20 % unterschätzt wurden (Abb. 3.5 d; Tab. 3.2, durchschnittl. WD). In diesem Fall sank der RMSE von 2.18 auf  $1.80 \text{ cm cm}^{-3}$  und der Bias erhöhte sich von 0.01 auf  $0.09 \text{ cm cm}^{-3}$  (Tab. 3.2).

Da für eine eindeutige Erkennung des Wurzelmaterials durch die Bildanalysesoftware ein ausreichender Kontrast zwischen Wurzeln und Hintergrund bestehen muss, wurden die Proben zusätzlich von oben beleuchtet (siehe Abb. 3.1). Auf diese Weise wurde eine ungleichmäßige Ausleuchtung der Scanfläche vermieden. Abb. 3.6 zeigt die Bilder eingescannter Wurzeln mit unzureichender (a) und ausreichender Beleuchtung (b) und die daraus resultierenden Binärbilder (c, d). Unzureichende Beleuchtung (Abb. 3.6 a) führte zu einem schlechten Kontrast zwischen Wurzeln und Hintergrund, was in einer drastischen Überschätzung der Wurzellängendichte resultierte. Weiß erscheinende Hintergrundbereiche wurden in diesem Fall als „on-pixels“ identifiziert und MATLAB interpretierte diese fälschlich als Wurzelfläche, was schließlich zu einer extrem hohen Wurzellängendichte von  $17.5 \text{ cm cm}^{-3}$  führte (Abb. 3.6 c). Ausreichende Beleuchtung (Abb. 3.6 b) verbesserte den Kontrast zwischen Wurzeln und Hintergrund deutlich und führte zu einem realistischen Wert für die Wurzellängendichte von  $0.5 \text{ cm cm}^{-3}$  (Abb. 3.6 d).

**Tab. 3.1: Mittelwert, Standardabweichung und Varianz und Variationskoeffizient der Wurzellängen-dichten in unterschiedlichen Bodentiefen**

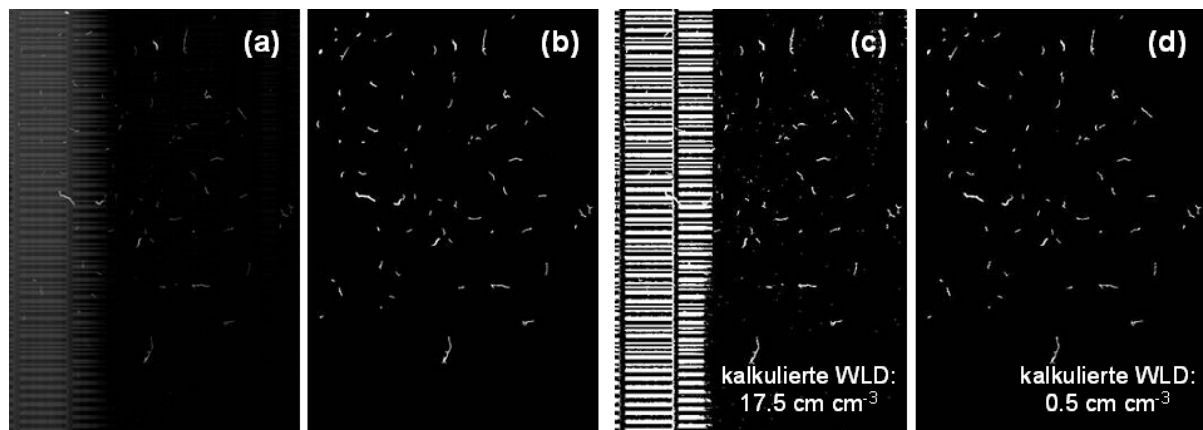
Tiefe [cm]	Mittelwert [cm cm <sup>-3</sup> ]	Standardabw. [cm cm <sup>-3</sup> ]	Varianz [(cm cm <sup>-3</sup> ) <sup>2</sup> ]	Variations- koeffizient
0-15	6.10	1.41	1.97	0.23
15-30	2.09	0.74	0.55	0.35
30-45	1.51	0.54	0.29	0.35
45-60	1.55	0.81	0.66	0.52
60-75	0.89	0.60	0.37	0.68
75-90	0.52	0.41	0.17	0.79
90-105	0.34	0.30	0.09	0.88
105-120	0.10	0.07	0.01	0.71



**Abb. 3.5: Beziehung zwischen den Ergebnissen der Bildanalyse und den Referenzmessungen unter Verwendung (A) der tatsächlichen Häufigkeitsverteilung gemessener Wurzelndurchmesser (B) der ersten zufällig generierten Häufigkeitsverteilung (C) der zweiten zufällig generierten Häufigkeitsverteilung (D) eines Durchschnittsdurchmessers für alle Bodentiefen**

**Tab. 3.2: Sensitivität der WLD-Kalkulation in Bezug auf unterschiedliche Häufigkeitsverteilungen von Wurzeldurchmessern (a) RMSE der WLD-Kalkulation und Aufteilung des MSE in Bias und Varianz (b) Korrelation ( $r^2$ ) zwischen Ergebnissen der Referenzmessungen und Bildanalyseergebnissen ( $n = 123$ ). Die tatsächliche Häufigkeitsverteilung ist fett gedruckt.**

WLD	Verteilung 1	Verteilung 2	Verteilung 3	durchschnittl. WD
(a)				
RMSE	<b>2.18</b>	2.72	1.96	1.80
MSE	<b>4.77</b>	7.41	3.83	3.23
Bias	<b>0.01</b>	0.35	0.01	0.09
Varianz	<b>4.76</b>	7.07	3.81	3.14
(b)				
$r^2$	<b>0.94</b>	0.95	0.95	0.95
Steigung	<b>0.99</b>	1.07	0.95	0.80
Achsenabschnitt	<b>0.03</b>	-0.03	0.05	0.08



**Abb. 3.6: Bilder eingescannter Wurzeln aus einer Bodentiefe von 75 – 90 cm mit (a) unzureichender und (b) ausreichender Ausleuchtung und die daraus resultierenden Binärbilder (c, d)**

### 3.4 Diskussion

Die Auswertung der deskriptiven Statistik ergab, dass die mittleren Wurzellängendichten in Abhängigkeit von der Bodentiefe zwischen 6.1 und 0.1  $\text{cm cm}^{-3}$  lagen und mit Ergebnissen anderer Untersuchungen vergleichbar sind. (MANSKE, VLEK 2003) z. B. berichten von Wurzellängendichten zwischen 2 und 10  $\text{cm cm}^{-3}$ , abhängig von Entwicklungsstadium der Pflanzen, Bodentiefe und Umweltbedingungen. (ASSENG U. A. 1998) ermittelten für Winterweizen Wurzellängendichten im Oberboden zwischen 2 und 13  $\text{cm cm}^{-3}$  und in Tiefen von 30 - 60 cm zwischen 0 und 4  $\text{cm cm}^{-3}$ . Wie auch in anderen Studien beobachtet, nahm der Variationskoeffizient mit zunehmender Bodentiefe zu (vgl. GRABARNIK, PAGÈS, BENGOUGH 1998; KÜCKE, SCHMID, SPIESS 1995). Geringes Wurzelwachstum in tieferen Bodenschichten mit relativ wenigen Hauptachsen, die von Wurzelanhäufungen lateral verzweigter Wurzeln

umgeben sind, könnte eine Erklärung dafür sein (GRABARNIK, PAGÈS, BENGOUGH 1998). Variationskoeffizienten für Getreide bewegen sich üblicherweise zwischen 30 und 70 % (BENGOUGH U. A. 2000), was mit den hier ermittelten Ergebnissen zwischen 23 und 88 % vergleichbar ist (Tab. 3.1).

Da der Wurzeldurchmesser die Analyseergebnisse beeinflusst, wurden die Effekte unterschiedlicher Häufigkeitsverteilungen von Wurzeldurchmessern und die Verwendung eines Durchschnittsdurchmessers untersucht. Es existieren verschiedenste Bildanalyse-systeme, die nicht nur die Wurzellängendichte, sondern auch den Wurzeldurchmesser ermitteln (DOWDY, NATER, DOLAN 1995; PAN, BOLTON 1991). Beim Vergleich zweier Bildanalyse-systeme stellten BOUMA, NIELSEN, KOUSTAAL 2000 fest, dass hohe Transformationsgrenzwerte zwar die Schätzung der Wurzellängendichte erleichtern können, aber zu einer Überschätzung der Wurzeldurchmesser feiner Wurzeln führen. Da die mit der hier beschriebenen Methode ermittelte Wurzellängendichte eine Funktion des Wurzeldurchmessers ist (siehe Gleichung 3.1) und daher stark von dessen Fehlerfreiheit abhängt, wurde der Durchmesser manuell gemessen. Diese manuelle Bestimmung der Durchmesser kann mit angemessenem Zeitaufwand durchgeführt werden. BOUMA, NIELSEN, KOUSTAAL 2000 betonen weiterhin, dass die automatische Bestimmung von Wurzellängen und Wurzeldurchmessern immer neu überprüft werden sollte, wenn neue Arten untersucht oder neue Software angewandt wird.

Eine wichtige Voraussetzung für die Analyse von Wurzelproben mit Bildanalyse-software ist eine gleichmäßig ausgeleuchtete Umgebung der Scanfläche, um einen einheitlichen Bild-contrast zu gewährleisten. Der Kontrast zwischen Wurzeln und Hintergrund muss ausreichend sein, damit das Wurzelmaterial von der Software eindeutig erkannt werden kann. Andere Bildanalyse-systeme nutzen hierfür Segmentierungstechniken, bei denen unterschiedliche Stufen von Konturenschärfung und Grauton-Grenzwerten kombiniert werden (SMUCKER U. A. 1987). Bei der hier beschriebenen Methode wurde nach BAUHHUS, MESSIER 1999 zusätzliche Beleuchtung zur Verminderung ungleichmäßig ausgeleuchteter Scanfläche eingesetzt. Abb. 3.6 zeigt Bilder eingescannter Wurzeln mit (a) unzureichender und (b) ausreichender Ausleuchtung und die daraus resultierenden Binärbilder (c, d). Unzureichende Beleuchtung (Abb. 3.6 a) führte zu einem schlechten Kontrast zwischen Wurzeln und Hintergrund und somit zu einer drastischen Überschätzung der Wurzellängendichte. In diesem Fall wurden weiß erscheinende Hintergrundbereiche als „on-pixels“ identifiziert, die MATLAB fälschlicherweise als Wurzelfläche interpretierte. Der daraus resultierende Wert von 17.5 cm Wurzeln je  $\text{cm}^{-3}$  Boden (Abb. 3.6 c) ist für Winterweizen unrealistisch, dessen

Wurzellängendichten in einer Bodentiefe von 75 - 90 cm normalerweise selten Werte von  $1.5 \text{ cm cm}^{-3}$  überschreiten (vgl. SHARMA, CHAUDHARY 1983; ZUO U. A. 2004). Ausreichende Beleuchtung (Abb. 3.6 b) verbesserte den Kontrast zwischen Wurzeln und Hintergrund deutlich und führte zu einem realistischen Wert von  $0.5 \text{ cm cm}^{-3}$  (Abb. 3.6 d).

Wurzellängendichten können mit gewöhnlichen Flachbettscannern und der vorgestellten Bildanalysemethode genau bestimmt werden, wenn die Häufigkeitsverteilung der Wurzel-durchmesser zuvor ermittelt wird. Da die Wurzeldurchmesser und deren Häufigkeitsverteilungen Einfluss auf die Qualität der Bildanalyseergebnisse ausüben, sollten sie sorgfältig bestimmt werden. Folgende Bedingungen sollten erfüllt werden, um mit der beschriebenen Methode korrekte Ergebnisse zu erhalten:

1. Die Gesamtwurzellänge einer Probe und die Wurzeldichte auf der Scanfläche sollten unterhalb kritischer Werte liegen. Es wurden Grenzwerte von 255 cm für die Gesamtwurzellänge und  $0.5 \text{ cm cm}^{-2}$  für die Wurzeldichte gewählt. Gegebenenfalls sollten die Proben in Teilproben zerlegt werden.
2. Für die automatische Umwandlung der ermittelten Wurzelfläche in Wurzellänge sollte ein gewichteter Wurzeldurchmesser durch Ermittlung der Häufigkeitsverteilung der Wurzeldurchmesser bestimmt werden.
3. Zusätzliche vertikale Beleuchtung der Scanfläche mit Lampen verstärkt den Kontrast zwischen Bildhintergrund und Wurzeln und verbessert dadurch die Genauigkeit der Bildanalyse.



#### **4 Untersuchung des Wurzelwachstums von Winterweizen an zwei unterschiedlichen Standorten unter Berücksichtigung von Bodeneigenschaften und Bodenwasser**



### 4.1 Einleitung

Die Menge des pflanzenverfügbaren Bodenwassers variiert in Abhängigkeit von Boden- und Pflanzencharakteristika wie z. B. der Textur bzw. der Wurzelverteilung und -tiefe (TOLK 2003). Da die Wasserverfügbarkeit zahlreiche physiologische Prozesse beeinflusst, ist sie der entscheidende Faktor für das Wachstum und die Ertragsbildung von Weizen (ATWELL, KRIEDEMANN, TURNBULL 1999; HAY 1999) bzw. von Nutzpflanzen im Allgemeinen. Kurzzeitiges Wasserdefizit kann zu einer Stagnation des Wurzelwachstums mit direkten Konsequenzen für Sprosswachstum und Ertrag führen (KLIMANEK 1987), anhaltend niedrige Wasserversorgung hingegen kann das Wurzelwachstum in tiefere Bodenschichten fördern (SCHROETTER, ROGASIK, SCHNUG 2006). Die Reaktion der Pflanzen auf Wasserstress ist unterschiedlich und abhängig vom Zeitpunkt dessen Auftretens, seiner Dauer und seines Ausmaßes (HSIAO, BRADFORD 1983). In diversen Studien wurde der Effekt von Wassermangel bzw. des Bodenwasserstatus' auf das Wurzelwachstum von Winterweizen und dessen Wasseraufnahme untersucht (z. B. CHAUDHARY, BHATNAGAR 1980; MEYER U. A. 1990; WEIR, BARRACLOUGH 1986; SHARMA, GHILDYAL 1977). WEIR, BARRACLOUGH 1986 berichten von einer Abnahme des Wurzelwachstums von Weizen während einer Trockenperiode in den oberen 40 cm des Bodens ohne verstärktes Wurzelwachstum im Unterboden. Hingegen wurde in einer Studie von ASSENG U. A. 1998 im Vergleich zu gleichmäßig bewässerten Weizenpflanzen bei den Varianten, die Trockenperioden ausgesetzt waren, ein Anstieg der Wurzellängendichte in einer Tiefe zwischen 30 und 60 cm ermittelt. Im Laufe von Bestockung und Schossen, wenn die Pflanzen das intensivste Sprosswachstum zeigen, nimmt die aktive Wurzelmasse bis zur Blüte zu, wobei die Menge an lebenden Wurzeln im Oberboden in den folgenden Entwicklungsstadien permanent abnimmt (SCHROETTER, ROGASIK, SCHNUG 2006). Die maximale Größe des Wurzelsystems wird also um den Zeitpunkt der Blüte erreicht (vgl. BARRACLOUGH, LEIGH 1984; BÖHM 1978). In Abhängigkeit von der Bodendichte und den Bodenwasserverhältnissen kann die Wurzeltiefe von Getreide im Bereich von 60 - 200 cm Tiefe liegen (BÖHM 1978; ROTH U. A. 1987). Die Fähigkeit der Pflanzen, Wasser und Nährstoffe im Boden zu erschließen, wird sowohl von deren Verfügbarkeit als auch vom Aufnahmevermögen der Pflanze bestimmt (BULJOVIC, ENGELS 2001), das unter anderem von der Austauschfläche zwischen Wurzeln und Boden abhängig ist. Diese wiederum wird von der Wurzellängendichte, also der Wurzellänge pro Volumeneinheit Boden, beeinflusst (REUTER 2006). Wurzelwachstum ist somit ein biologischer Prozess, der in starkem Maße die Rate bestimmt, mit der Pflanzen

Bodenressourcen für Wachstum bzw. Ertragsbildung nutzen (LAMBERS, CHAPIN, PONS 2008), und kann daher weit reichende ökonomische Konsequenzen für die landwirtschaftliche Praxis haben. Ziel dieser Untersuchung war, das Wurzelwachstum von Winterweizen an zwei unterschiedlichen Standorten in Deutschland unter Berücksichtigung von Bodeneigenschaften und Bodenwasser zu untersuchen, um zu überprüfen inwieweit sich die unterschiedlichen Bedingungen auf die Durchwurzelung an den beiden Versuchsstandorten auswirken.

## **4.2 Material und Methoden**

### **4.2.1 Statistische Auswertung**

Zu vergleichende Stichproben wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung und mit dem Levene-Test auf Varianzhomogenität geprüft. Da Normalverteilung und Varianzhomogenität nicht vorlagen, wurde zum Vergleich der abhängigen Stichproben der beiden Untersuchungszeitpunkte bzw. der beiden Untersuchungsjahre der Wilcoxon-Rangsummentest durchgeführt. Zum Vergleich der unabhängigen Stichproben der unterschiedlichen Monitoringpunkte wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt.

### **4.2.2 Wurzeluntersuchungen**

#### **Probennahme und -aufbereitung**

Die Entnahmemethode sowie die Aufbereitung der Wurzelproben werden ausführlich in Kapitel 3.2.1 beschrieben, weshalb an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen wird.

#### **Bestimmung der Wurzellängendichte**

Die Bestimmung der Wurzellängendichte erfolgte mit einer selbst entwickelten halbautomatischen Bildanalysemethode, die in Kapitel 3 dieser Arbeit beschrieben ist.

### **4.2.3 Bodenwassermessung**

#### **Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes mittels TDR**

Zur Messung des volumetrischen Wassergehaltes wurden die ECH<sub>2</sub>O-Sonden EC-10 der Firma Decagon Devices verwendet, die nach dem Verfahren der Time Domain Reflectometry (TDR) messen. Die Bestimmung des volumetrischen Wassergehaltes im Boden erfolgt indirekt, indem ein elektromagnetischer Spannungsimpuls erzeugt und dessen Ausbreitungs-

geschwindigkeit im Boden zwischen den beiden Elektrodenstäben der Sonden ermittelt wird. Das Verfahren beruht darauf, dass die Laufzeit der elektromagnetischen Wellen im Bodenkörper von der Dielektrizität des umgebenden Mediums abhängt. Wasser hat eine deutlich höhere Dielektrizitätszahl ( $\epsilon_w \approx 81$ ) als mineralische Bodenpartikel ( $\epsilon_s \approx 3 \dots 5$ ) oder Luft ( $\epsilon_a \approx 1$ ). Je höher die Dielektrizitätszahl des umgebenden Mediums ist, umso stärker wird die Reflexion des elektrischen Pulses verzögert. Unterschiede und Veränderungen des Wassergehaltes werden also durch die Auswertung der Reflexionsgeschwindigkeit des elektrischen Pulses zwischen den Elektrodenstäben erfasst.

Die Messungen wurden während der Vegetationsperioden 2005 und 2006 sowohl am Standort Rabenberg als auch am Standort Finkenherd an den Messpunkten 1 und 2 durchgeführt (Abb. 2.1). Bei diesen Punkten handelte es sich jeweils um einen trockeneren und einen feuchten Standort (Beschreibung der Profile siehe Kap. 4.3). Die Sonden wurden horizontweise mit vier Wiederholungen pro Horizont in den Wänden ausgehobener Profilgruben installiert. Nach Installation der Sonden wurden die Gruben wieder zugeschüttet und die gemessenen Wassergehalte über den 5-Kanal-Daten-logger Em5 (Decagon Devices) erfasst. Aus den alle zwei Stunden gemessenen Werten wurden Tagesmittelwerte gebildet.

Laut Handbuch messen die Sonden mit der Werkskalibrierung in den meisten mineralischen Böden mit einer Genauigkeit von  $\pm 10\%$ , wobei eine sehr aufwändige bodenspezifische Kalibrierung die Genauigkeit auf  $\pm 2\%$  erhöhen würde. Nach Rücksprache mit dem Vertreiber der ECH2O-Sonden (UMS GmbH München) wurden die Sondenwerte mit Felddaten verglichen und horizontspezifische Korrekturfaktoren berechnet, mit denen die ECH<sub>2</sub>O-Werte dann korrigiert wurden. Als Vergleichsdaten wurden die volumetrischen Wassergehalte genutzt, die sich durch Berücksichtigung von Bodendichteinformationen aus den horizontweise bestimmten gravimetrischen Wassergehalten ergaben.

### **Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes**

Die Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes erfolgte für alle Monitoringpunkte der beiden Versuchsschläge horizontweise und zu mindestens drei Zeitpunkten während der Vegetationsperiode. Hierzu wurde aus drei Einstichen mit dem Bohrstock eine Mischprobe je Horizont genommen. Um Wasserverlust durch Verdunstung zu vermeiden, wurden die Proben direkt nach der Entnahme bis zur Weiterverarbeitung im Labor in einer Kühlbox gelagert. Die Proben wurden feucht gewogen ( $B_f$ ), dann bei 105°C getrocknet und nach dem Trocknen nochmals gewogen ( $B_t$ ).

Die Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes ( $W_g$ ) in Gewichtsprozent erfolgte mit nachstehender Formel:

$$W_g = \left[ \frac{(B_f - B_t)}{B_t} \right] * 100 \quad (4.1)$$

(HARTGE, HORN 1992)

### 4.2.4 Bodendaten

Die in dieser Arbeit verwendeten Daten zur Textur, Dichte und Humusgehalt wurden von Projektpartnern des preagro II-Verbundes erhoben (WEHRHAN U. A. 2008) und für die vorliegende Arbeit zur Verfügung gestellt. Die Texturbestimmung erfolgte mit einer Kombination von Schlämmanalyse (Sandfraktionen) und Pipettmethode nach KÖHN (Schlufffraktionen und Ton), die Bodendichte wurde mit Stechzylindern ( $100 \text{ cm}^3$ ) bestimmt. Die Benennung der Horizonte und Texturen erfolgte nach KA5 (Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage).

## 4.3 Ergebnisse und Diskussion

Die beiden Versuchsschläge Rabenberg in Groß Twülpstedt und Finkenherd in Wulfen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Geogenese und Pedogenese. Die auf dem Schlag Rabenberg auftretenden Böden sind geprägt durch Juraton, der von glazialen Deckschichten unterschiedlicher Mächtigkeit (60 - 120 cm) überdeckt ist und teilweise bis an die Oberfläche ansteht (HERBST 2002). Die Böden des Schlages Finkenherd sind durch unterschiedlich mächtige Sandlöss- und Lössauflagen über saaleiszeitlichem Geschiebemergel und tertiären Sanden und Kiesen geprägt (ALTERMANN 1995). Informationen über Horizontmächtigkeiten, Anteile der Feinbodenarten und Dichte an den Monitoringpunkten auf den Versuchsschlägen können Tab. 4.1 und Tab. 4.2 entnommen werden. Aus den Tabellen ist ersichtlich, dass zwischen den beiden Schlägen erkennbare Unterschiede bezüglich der Lagerungsdichte bestehen, die deutlichen Einfluss auf die Durchwurzelung des Bodens hat (vgl. LABOSKI U. A. 1998; MONTAGU, CONROY, ATWELL 2001; TAYLOR, BRAR 1991). An den Untersuchungspunkten auf dem Schlag Rabenberg bewegen sich die Trockenroh- und Lagerungsdichten eher in den nach KA5 ausgewiesenen hohen ( $1.6 \text{ bis} < 1.8$  bzw.  $1.8 \text{ bis} < 2.0 \text{ g cm}^{-3}$ ) bis sehr hohen ( $1.8 - 2.0$  bzw.  $> 2.0 \text{ g cm}^{-3}$ ), an denen auf dem Schlag Finkenherd

**Tab. 4.1: Anteile der Feinbodenarten Ton (T), Schluff (U) und Sand (S) und Anteile an Fein-, Mittel- und Grobsand (fS, mS, gS) sowie Trockenrohdichte ( $\rho_t$ ) und Lagerungsdichte (LD) in den unterschiedlichen Horizonten der Monitoringpunkte auf dem Versuchsschlag Rabenberg**

MP	Horizont	Tiefe (cm)	Mächtiggk. (dm)	T (%)	U (%)	S (%)	fS (%)	mS (%)	gS (%)	$\rho_t$ (g cm <sup>-3</sup> )	LD (g cm <sup>-3</sup> )
1	1	30	3.0	19.9	41.4	38.7	11.2	24.0	3.5	1.6	1.8
	2	75	4.5	19.3	42.7	38.0	11.0	23.7	3.3	1.6	1.8
	3	130	5.5	9.7	32.0	58.3	20.3	31.3	6.7	1.8	1.9
2	1	20	2.0	29.1	55.8	15.1	6.2	7.1	1.8	1.7	1.9
	2	40	2.0	35.5	55.3	9.2	3.7	3.2	2.3	1.8	2.1
	3	75	3.5	16.6	62.2	21.2	8.8	10.6	1.8	1.9	2.1
	4	120	4.5	3.2	16.1	80.7	27.1	47.3	6.3	1.2	1.5
3	1	25	2.5	9.8	18.7	71.5	29.4	33.9	8.2	1.6	1.7
	2	80	5.5	11.9	21.9	66.2	24.8	36.6	4.8	1.8	1.9
4	1	25	2.5	5.9	22.1	72.0	31.4	35.0	5.6	1.7	1.7
	2	50	2.5	4.5	20.7	74.8	29.1	37.2	8.5	1.8	1.8
	3	100	5.0	2.3	20.2	77.5	30.4	37.5	9.6	1.8	1.9
	4	150	5.0	9.3	18.2	72.5	8.8	36.7	27.0	1.9	2.0
5	1	20	2.0	46.1	40.1	13.8	5.1	3.2	5.5	1.8	2.2
	2	50	3.0	25.8	21.2	53.0	17.8	26.6	8.6	1.6	1.8
	3	120	7.0	51.5	36.2	12.3	4.9	2.5	4.9	1.6	2.1
6	1	25	2.5	2.8	23.2	74.0	33.5	34.1	6.4	1.6	1.6
	2	50	2.5	3.4	17.0	79.6	32.6	39.9	7.1	1.8	1.9
	3	90	4.0	8.0	23.2	68.8	25.0	33.6	10.2	1.7	1.8
	4	150	6.0	4.9	23.1	72.0	38.8	29.9	3.3	1.8	1.9

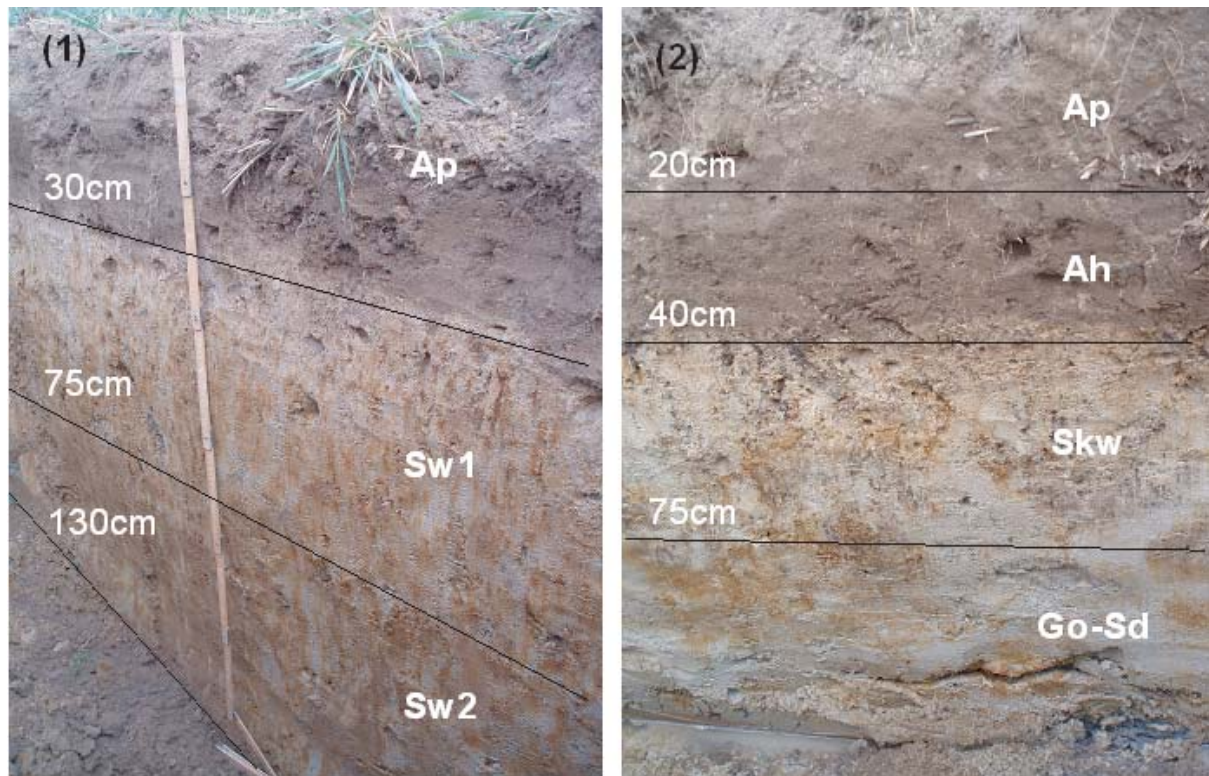
dagegen in mittleren (1.4 bis < 1.6 bzw. 1.6 bis < 1.8 g cm<sup>-3</sup>) bis hohen Bereichen (1.6 bis < 1.8 bzw. 1.8 bis < 2.0 g cm<sup>-3</sup>).

Beispielhaft für die unterschiedlichen Bodenbedingungen sind die Ergebnisse der jeweiligen Profilaufnahmen an den Intensivmesspunkten der beiden Versuchsschläge aufgeführt. Der Bodentyp an Intensivmesspunkt 1 des Schläges Rabenberg ist ein Pseudogley - ein durch Stauwasser geprägter Boden, der aufgrund des jahreszeitlichen Wechsels des Stauwasserstandes die so genannte Marmorierung aufweist (Abb. 4.1-1). Unter dem 30 cm mächtigen Bearbeitungshorizont (Ap) aus schwach sandigem Lehm (Ls2) mit einem Humusgehalt von 1.5 % und einer Bodendichte von 1.6 g cm<sup>-3</sup> liegt ein erster Stauwasser führender Horizont (Sw) von 45 cm Mächtigkeit, ebenfalls aus schwach sandigem Lehm (Humus: 0.6 %, Dichte 1.7 g cm<sup>-3</sup>), gefolgt von einem zweiten Sw-Horizont aus mittel lehmigem Sand (Sl3) von ca. 70 cm Mächtigkeit (Humus: 0.2 %, Dichte: 1.8 g cm<sup>-3</sup>). Die Grenze zwischen diesem Sw-Horizont und dem darauf folgenden dichteren und stauenden Horizont (Sd; keine Angaben zu Humus und Dichte, Bodenart nach Fingeransprache: reiner Ton (Tt)) liegt bei ca. 2 m Tiefe. An diesem durch glaziale Lehmsande über Sanden und einer pflanzenverfügbaren

**Tab. 4.2: Anteile der Feinbodenarten Ton (T), Schluff (U) und Sand (S) und Anteile an Fein-, Mittel- und Grobsand (fS, mS, gS) sowie Trockenrohdichte ( $\rho_t$ ) und Lagerungsdichte (LD) in den unterschiedlichen Horizonten der Monitoringpunkte auf dem Versuchsschlag Finkenherd**

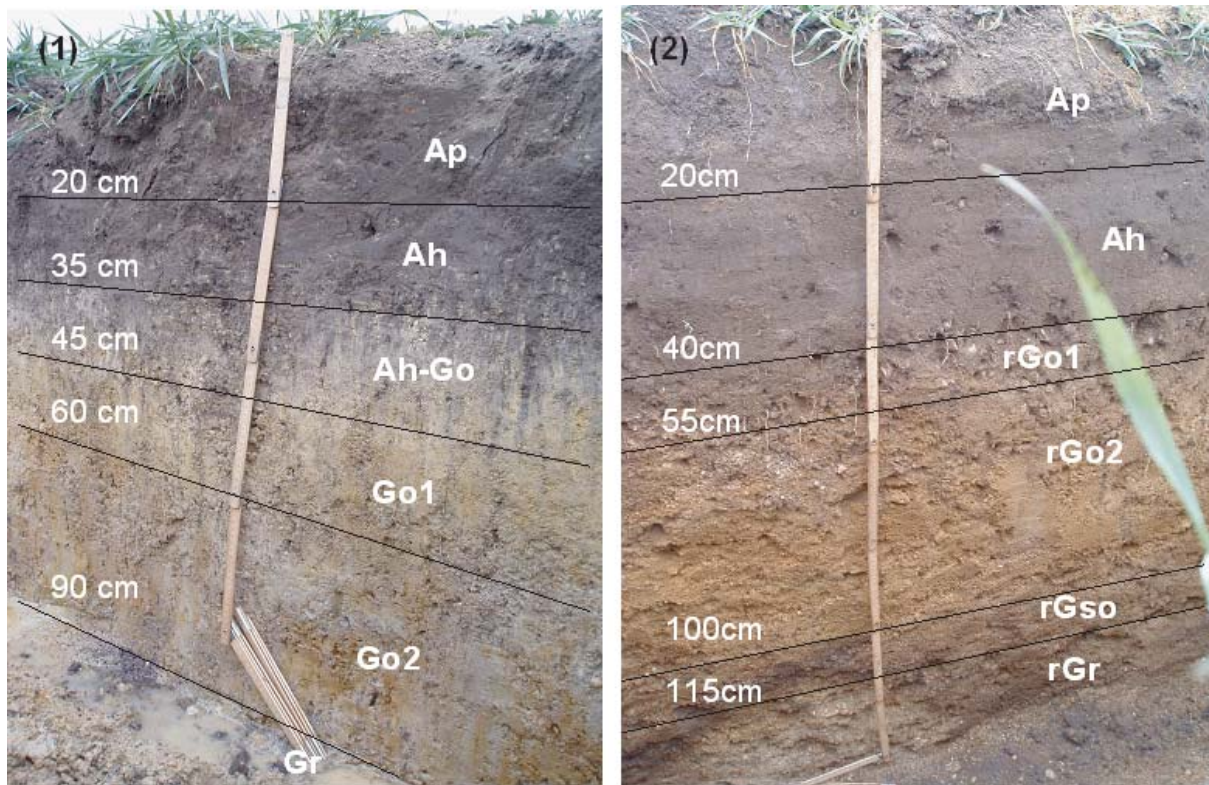
MP	Horizont	Tiefe (cm)	Mächtiggk. (dm)	T (%)	U (%)	S (%)	fS (%)	mS (%)	gS (%)	$\rho_t$ (g cm <sup>-3</sup> )	LD (g cm <sup>-3</sup> )
1	1	35	3.5	11.6	45.5	42.9	19.4	19.5	4.0	1.5	1.6
	2	45	1.0	6.3	32.2	61.5	24.5	30.9	6.1	1.5	1.5
	3	60	1.5	10.2	46.1	43.7	11.6	25.5	6.6	1.7	1.8
	4	80	2.0	3.1	21.4	75.5	10.9	25.7	38.9		
2	1	40	4.0	0.1	11.3	88.7	32.4	2.6	53.7	1.7	1.7
	2	55	1.5	6.4	5.6	88.0	2.1	15.0	70.9	1.7	1.8
	3	100	4.5	0.1	6.4	93.6	2.4	17.9	73.3	1.6	1.6
	4	115	1.5	11.3	1.2	87.5	2.0	18.1	67.4	1.6	1.7
	5	125	1.0	5.0	2.2	92.8	1.3	22.0	69.5	1.8	1.8
3	1	35	3.5	17.5	52.4	30.1	10.4	18.5	1.2	1.5	1.6
	2	55	2.0	19.1	56.8	24.1	8.6	14.6	0.9	1.5	1.7
	3	80	2.5	3.4	34.3	62.3	20.3	40.6	1.4	1.8	1.8
	4	125	4.5	14.0	10.0	76.0	27.3	40.5	8.2	1.9	2.0
	5	170	4.5	13.8	19.2	67.0	24.8	34.8	7.4	2.0	2.1
4	1	35	3.5	20.5	51.2	28.3	9.2	16.9	2.2	1.5	1.7
	2	70	3.5	16.3	54.9	28.8	9.5	17.2	2.1	1.4	1.6
	3	85	1.5	19.8	43.5	36.7	9.9	22.1	4.7	1.8	1.9
	4	120	3.5	6.7	3.4	89.9	5.0	41.1	43.8	1.9	1.9
5	1	40	4.0	27.4	57.5	15.1	5.6	8.0	1.5	1.6	1.8
	2	75	3.5	16.6	48.8	34.6	10.6	21.9	2.1	1.6	1.7
	3	110	3.5	22.4	51.4	26.2	10.0	13.3	2.9	1.8	2.0
6	1	30	3.0	26.5	18.7	54.8	19.2	26.9	8.7	1.6	1.8
	2	60	3.0	12.7	40.7	46.6	12.9	32.7	1.0	1.7	1.8
	3	100	4.0	14.2	70.3	15.5	8.6	6.1	0.8	1.7	1.9
	4	105	0.5	8.8	11.4	79.8	7.6	23.3	48.9	1.7	1.8
7	1	30	3.0	10.0	19.9	70.1	26.7	36.7	6.7	1.6	1.7
	2	50	2.0	10.4	19.4	70.2	26.9	34.9	8.4	1.7	1.8
	3	85	3.5	14.8	17.9	67.3	28.8	31.7	6.8	1.8	2.0
	4	120	3.5	14.8	17.9	67.3	28.8	31.7	6.8	2.0	2.1
8	1	30	3.0	7.4	12.5	80.1	21.0	57.4	1.7	1.5	1.5
	2	60	3.0	17.6	43.9	38.5	10.9	25.8	1.8	1.5	1.6
	3	85	2.5	18.9	41.1	40.0	10.7	28.0	1.3	1.7	1.9
9	1	30	3.0	14.7	48.0	37.3	11.4	24.3	1.6	1.4	1.5
	2	65	3.5	19.8	47.5	32.7	11.1	19.7	1.9	1.5	1.6
	3	105	4.0	7.3	29.0	63.7	17.2	42.3	4.2	1.8	1.8
10	1	35	3.5	21.6	27.7	50.7	22.9	22.8	5.0	1.5	1.7
	2	70	3.5	22.9	60.1	17.0	1.1	14.7	1.2	1.5	1.7
	3	100	3.0	19.5	49.9	30.6	10.0	18.7	1.9	1.8	2.0





**Abb. 4.1: Bodenprofile der Intensivmesspunkte 1 und 2 auf dem Versuchsschlag Rabenberg; (1) Bodentyp: Pseudogley; 0 – 30 cm: Bearbeitungshorizont aus Ls2; 30 – 75 cm: Stauwasser leitender Horizont aus Ls2; 75 – 130 cm: Stauwasser leitender Horizont aus Sl3 (2) Bodentyp: Gley-Pseudogley; 0 – 20 cm: Bearbeitungshorizont aus Lu; 20 – 40 cm: humoser Oberbodenhorizont aus Lu; 40 – 75 cm: konkretionshaltiger, Stauwasser leitender Horizont aus Sl2; 75 – 120 cm: leicht stauender, grundwasser- beeinflusster Übergangshorizont aus Uls**

Bodenwassermenge im oberen Meter von ca. 130 mm charakterisierten Messpunkt sind die Pflanzen im späteren Verlauf der Vegetationsperiode mäßigem Wasserstress ausgesetzt. Dies wird durch die von Partnern des preagro II-Projektes an den Monitoringpunkten des Versuchsschlages durchgeführten Stressbonituren bestätigt (Daten nicht gezeigt). An Intensivmesspunkt 2 des Schlages Rabenberg liegt ein Gley-Pseudogley vor (Abb. 4.1-2). Dieser Boden ist neben dem Stauwassereinfluss auch durch Grundwassereinfluss geprägt, wobei der Stauwassereinfluss überwiegt. Auf den 20 cm mächtigen Ap-Horizont aus schluffigem Lehm (Lu) mit einem Humusgehalt von 1.8 % und einer Bodendichte von  $1.7 \text{ g cm}^{-3}$  folgt ein 20 cm mächtiger humoser Oberbodenhorizont aus schluffigem Lehm (Ah; Humus: 1.8 %, Dichte:  $1.7 \text{ g cm}^{-3}$ ). Auf den Ah-Horizont folgt ein 35 cm mächtiger konkretionshaltiger, Stauwasser führender Horizont aus schwach lehmigem Sand (Skw; Humus: 0.1 %, Dichte:  $1.8 \text{ g cm}^{-3}$ ), unter dem ein Übergangshorizont aus sandig lehmigem Schluff (Uls) von 45 cm Mächtigkeit liegt, der sowohl leicht stauend wirkt als auch vom Grundwasser beeinflusst ist und Oxidationsmerkmale enthält (Go-Sd; Humus: 0.5 %, Dichte:  $1.9 \text{ g cm}^{-3}$ ). Unter diesem Übergangshorizont ab einer Tiefe von 120 cm liegt der stauende Sd-Horizont aus mittel schluffigem Ton (Tu3; Humus: 0.3 %; Dichte:  $1.8 \text{ g cm}^{-3}$ ).



**Abb. 4.2: Bodenprofile der Intensivmesspunkte 1 und 2 auf dem Versuchsschlag Finkenherd; (1) Bodentyp: Gley; 0 – 20 cm: Bearbeitungshorizont aus Slu; 20 – 35 cm: humoser Oberbodenhorizont aus Slu; 35 – 45 cm: humoser, grundwasserbeeinflusster Übergangshorizont aus Su3; 45 – 60 cm: Oxidationshorizont aus Slu; 60 – 90 cm: Oxidationshorizont aus Su2 (2) Bodentyp: reliktscher Brauneisengley; 0 – 20 cm: Bearbeitungshorizont aus Su2; 20 – 40 cm: humoser Oberbodenhorizont aus Su2; 40 – 55 cm: reliktscher, Oxidationshorizont aus St2; 55 – 100 cm: reliktscher, Oxidationshorizont aus Ss; 100 – 115 cm: reliktscher, brauneisenhaltiger Oxidationshorizont aus St2; ab 115 cm: reliktscher Reduktionshorizont aus Ss**

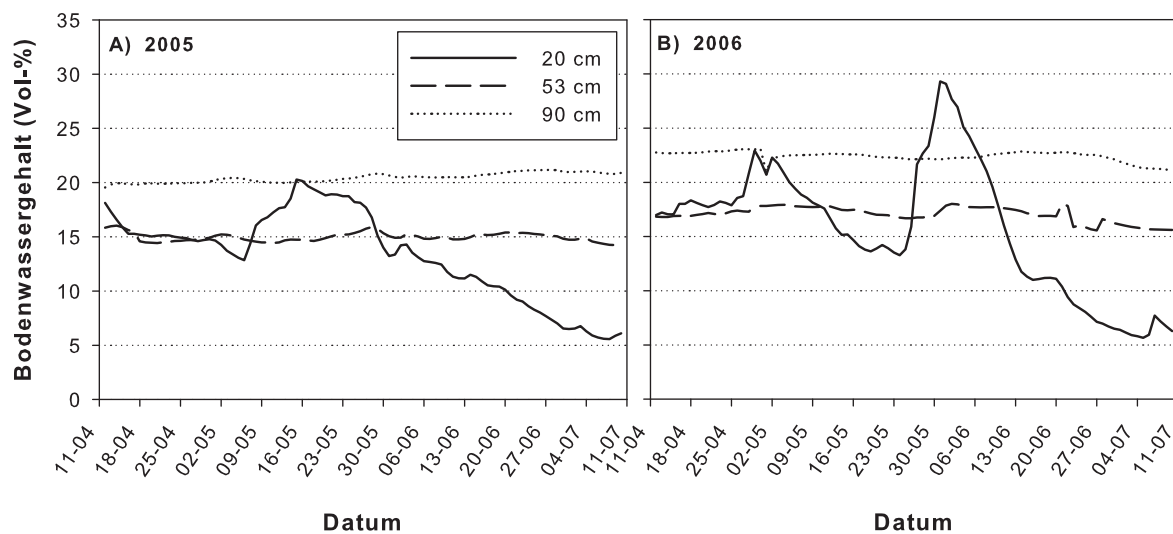
Dieser Messpunkt ist durch glaziale Lehmsande über Schluffton, einem Grundwasserstand von ca. 1.2 m und einer pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge im oberen Meter von ca. 190 mm charakterisiert. Die Pflanzen sind unter diesen Bedingungen im Vergleich zum Intensivmesspunkt 1 zwar besser mit Wasser versorgt, aber dennoch im späteren Verlauf der Vegetationsperiode Wasserstress ausgesetzt (entspricht Ergebnissen der Stressbonituren).

Bei dem Bodentypen am Intensivmesspunkt 1 des Schlages Finkenherd handelt es sich um einen Gley, also einen Grundwasser beeinflussten Boden (Abb. 4.2-1). Unter dem 20 cm mächtigen Ap-Horizont aus schluffig lehmigem Sand (Slu) (Humus: 2.6 %, Dichte:  $1.5 \text{ g cm}^{-3}$ ) liegt ein 15 cm mächtiger Ah-Horizont, ebenfalls aus schluffig lehmigem Sand (Humus: 2.6 %, Dichte:  $1.5 \text{ g cm}^{-3}$ ), auf den ein 10 cm mächtiger Übergangshorizont aus mittel schluffigem Sand (Su3) (Ah-Go) folgt (Humus: 1.0 %, Dichte:  $1.5 \text{ g cm}^{-3}$ ). Auf diesen Übergangshorizont folgen zwei Go-Horizonte von 15 cm Mächtigkeit aus schluffig lehmigem Sand bzw. von 30 cm Mächtigkeit aus schwach schluffigem Sand (Humus: 0.2 %, Dichte:  $1.7 \text{ g cm}^{-3}$ ), unter denen der Gr-Horizont liegt (keine Angaben zu Textur, Humusgehalt und

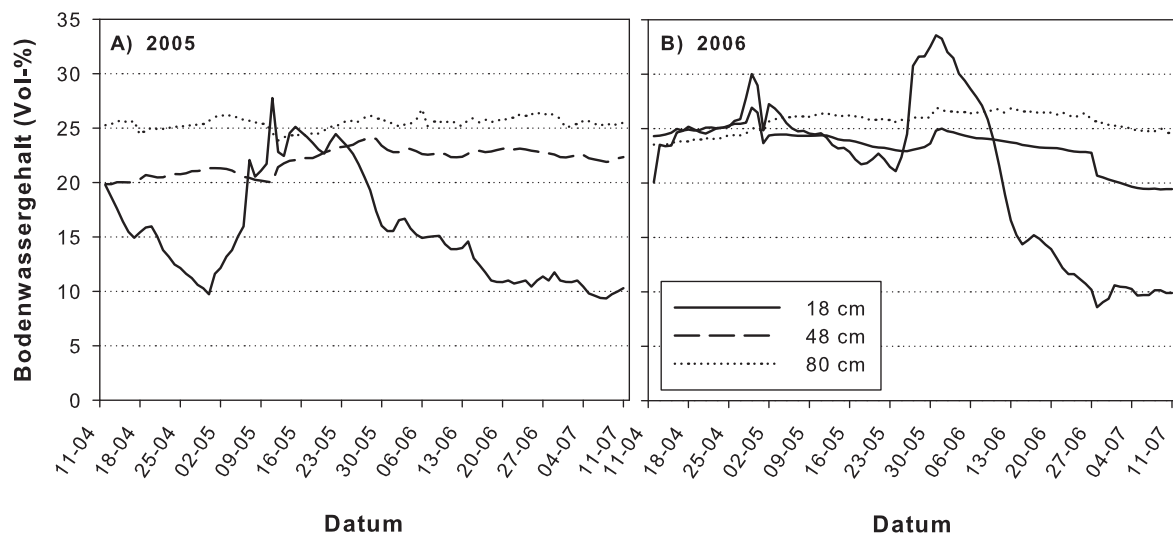
Bodendichte). An diesem Messpunkt, der durch Sandlöss über Geschiebemergel und einen Grundwasserabstand von ca. 1.0 m charakterisiert ist (pflanzenverfügbare Bodenwassermenge im oberen Meter: ca. 300 mm), sind die Pflanzen während der gesamten Vegetationsperiode ausreichend mit Wasser versorgt (entspricht Ergebnissen der Stressbonituren). An Intensivmesspunkt 2 des Schläges Finkenherd liegt ein reliktscher Brauneisengley vor (Abb. 4.2-2). Die Gleymerkmale sind durch Absenkung des Grundwassers reliktscher Natur, und es tritt ein Horizont auf, in dem sich Brauneisen abgesetzt hat (Gso). Auf den 20 cm mächtigen Ap-Horizont aus schwach schluffigem Sand (Humus: 1.8 %, Dichte:  $1.7 \text{ g cm}^{-3}$ ) folgt ein 20 cm mächtiger Ah-Horizont aus ebenfalls schwach schluffigem Sand (Humus: 1.8 %, Dichte:  $1.7 \text{ g cm}^{-3}$ ), unter dem zwei reliktsche Go-Horizonte von 15 cm Mächtigkeit aus schwach tonigem Sand bzw. von 45 cm Mächtigkeit aus reinem Sand liegen (Humus: 0.3 bzw. 0.1 %, Dichte:  $1.7$  bzw.  $1.6 \text{ g cm}^{-3}$ ). Auf diese beiden Horizonte folgt ein 15 cm mächtiger, brauneisenhaltiger Oxidationshorizont aus schwach tonigem Sand (Humus: 0.3 %, Dichte:  $1.6 \text{ g cm}^{-3}$ ), unter dem der reliktsche Gr-Horizont aus reinem Sand mit einer Bodendichte von  $1.8 \text{ g cm}^{-3}$  und einem Humusgehalt von 0.2 % liegt. An diesem durch Sandlöss über Sand und Kies und eine pflanzenverfügbare Bodenwassermenge im oberen Meter von ca. 60 mm charakterisierten Messpunkt sind die Pflanzen aufgrund der niedrigen Wasserhaltekapazität des Bodens im Verlauf der Vegetationsperiode starkem Wasserstress ausgesetzt (entspricht Ergebnissen der Stressbonituren).

Die unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen der jeweiligen Standorte werden anhand von Abb. 4.3 bis Abb. 4.6 deutlich. In Abb. 4.3 und Abb. 4.4 sind die volumetrischen Bodenwassergehalte in unterschiedlichen Bodentiefen an den Intensivmesspunkten der Versuchsschläge während der Vegetationsperiode in den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 dargestellt. Am staunässebeeinflussten Intensivmesspunkt 1 des Schläges Rabenberg schwankte der volumetrische Wassergehalt im Oberboden - in Abhängigkeit von der Bodenaustrocknung und der Wiederbefeuchtung durch Niederschlag - im Jahr 2005 bis Anfang Juni in Bereichen zwischen 15 und 20 % und fiel dann kontinuierlich bis auf ca. 5 % ab. Im Jahr 2006 zeigte sich ein ähnliches Bild, wobei die Gehalte in diesem Jahr etwas höher lagen und bis Mitte Juni in Bereichen zwischen 15 und 30 % schwankten. Die volumetrischen Wassergehalte im Unterboden waren über die Vegetationsperioden 2005 und 2006 annähernd konstant und lagen in 50 cm Tiefe bei Werten von 15 bis 17 % und in 90 cm Tiefe bei 20 bis 23 %.





**Abb. 4.3: Volumetrischer Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen am Intensivmesspunkt 1 auf dem Schlag Rabenberg während der Vegetationsperiode in den Jahren 2005 (A) und 2006 (B)**

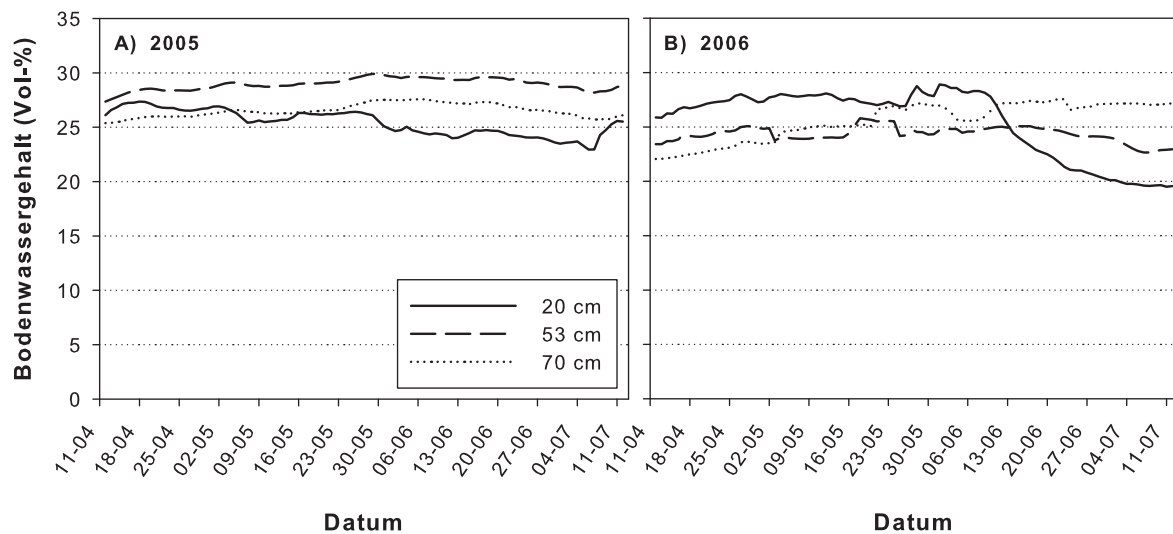


**Abb. 4.4: Volumetrischer Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen am Intensivmesspunkt 2 auf dem Schlag Rabenberg während der Vegetationsperiode in den Jahren 2005 (A) und 2006 (B)**

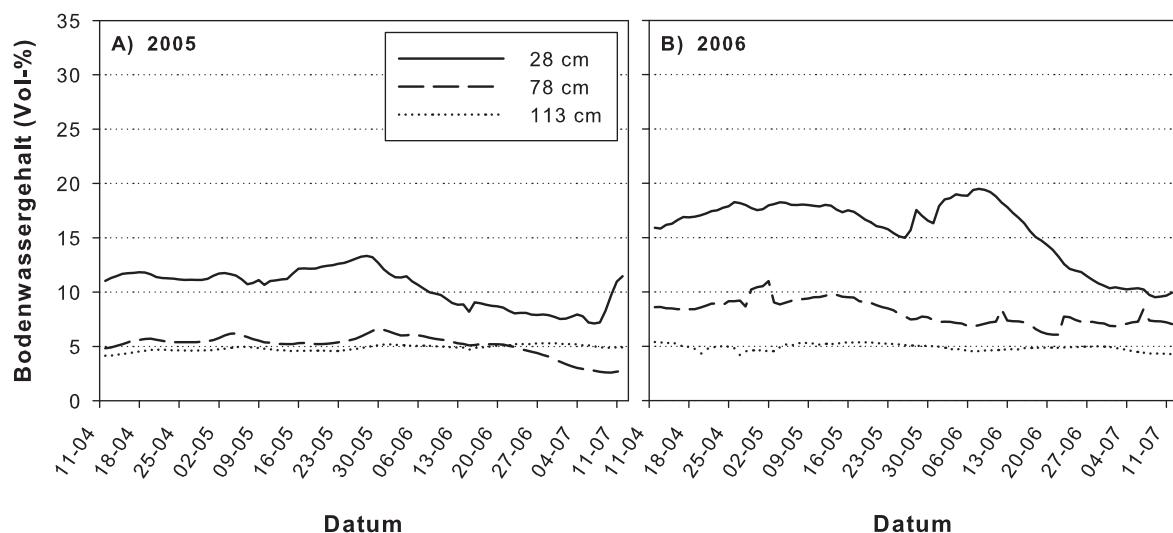
Am Intensivmesspunkt 2 fielen die volumetrischen Wassergehalte im Oberboden in der Vegetationsperiode 2005 bis Anfang Mai von 20 auf 10 % ab, stiegen dann wieder an und schwankten bis Mitte Juni in Bereichen zwischen 15 und 25 %, um dann wieder auf ca. 10 % abzufallen. Im Jahr 2006 lagen die Gehalte etwas höher und bewegten sich bis Mitte Juni zwischen 20 und 30 %, fielen dann aber wie im Jahr 2005 auf ca. 10 % ab. Die Gehalte im Unterboden lagen sowohl im Jahr 2005 als auch im Jahr 2006 in 50 cm Tiefe zwischen 20 und 25 % und in 80 cm Tiefe um 25 %. An Intensivmesspunkt 1 des Schläges Finkenherd, bei dem der Grundwasserspiegel bei ca. 1 m steht, schwankten die volumetrischen Wassergehalte

in der Vegetationsperiode 2005 im Oberboden nur schwach um einen Bereich um 25 %. Im Jahr 2006 lagen die Gehalte bis Anfang Juni zwischen 25 und 30 % und fielen dann kontinuierlich auf ca. 20 % ab. Im Unterboden lagen die Gehalte im Jahr 2005 etwas höher als im Jahr 2006. In einer Tiefe von 50 cm traten volumetrische Wassergehalte um ca. 29 %, in 90 cm Tiefe um 27 % auf. Im Jahr 2006 lagen die Gehalte in 50 cm Tiefe bei ca. 25 % und in 90 cm Tiefe zwischen 17 und 23 %. Am Intensivmesspunkt 2 lagen die volumetrischen Wassergehalte in der Vegetationsperiode 2005 im Oberboden bis Anfang Juni bei 11 - 13 %, fielen dann auf ca. 7 % ab und stiegen Mitte Juli nochmals auf ca. 11 % an. Im Jahr 2006 lagen die Gehalte etwas höher und schwankten zunächst zwischen 15 und 20 %, fielen dann ab Mitte Juni aber kontinuierlich auf 10 % ab. Die Gehalte im Unterboden beliefen sich im Jahr 2005 in 80 und 135 cm Tiefe auf 5 %, im Jahr 2006 in 80 cm Tiefe auf 5 - 10 % und in 135 cm Tiefe, wie auch 2005, auf 5 %.

Da die zeitlich hoch aufgelösten Messungen des volumetrischen Bodenwassergehaltes nur an den Intensivmesspunkten der Versuchsschläge durchgeführt wurden, wurde zum Vergleich aller Monitoringpunkte zusätzlich der gravimetrische Bodenwassergehalt an den Punkten gemessen. Um die verschiedenen Monitoringpunkte auf den Versuchsschlägen besser miteinander vergleichen zu können, wurde für jeden Untersuchungszeitpunkt aus den horizontweise gemessenen gravimetrischen Wassergehalten ein gewichtetes Mittel bis 1.0 m Tiefe gebildet. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.7 und Abb. 4.8 dargestellt. Abb. 4.7 zeigt, dass sich auf dem Rabenberg der Untersuchungspunkt 5 von den übrigen Monitoringpunkten abhebt. An diesem Punkt liegen die gemittelten gravimetrischen Wassergehalte in beiden Jahren deutlich höher als an den anderen Punkten. Der hohe gravimetrische Wassergehalt ist auf den hohen Tongehalt an diesem Messpunkt zurückzuführen (Tab. 4.1), der aufgrund dessen eine hohe Wasserspeicherfähigkeit besitzt. Die übrigen Monitoringpunkte unterscheiden sich bezüglich des mittleren Wassergehaltes nicht wesentlich. Die Gehalte bis 1.0 m Tiefe liegen mit Ausnahme des letzten Beprobungstermins im Juni 2005 bzw. Juli 2006 meist in Bereichen um 10 und 15 %. Auf dem Versuchsschlag Finkenherd konnten im Jahr 2005 an den Monitoringpunkten 4 und 6 keine Proben genommen werden, so dass für diese Punkte keine Daten abgebildet sind. Bei Betrachtung von Abb. 4.8 fällt insbesondere der Punkt 2 auf, an dem die mittleren Wassergehalte bis 1.0 m meist nur bei maximal 10 % liegen. Verglichen mit den übrigen Monitoringpunkten auf dem Schlag, deren Gehalte sich meist in Bereichen um 13 bis 16 % bewegen, ist dies gering. Der niedrige Wassergehalt ist auf den hohen Sandgehalt an diesem Punkt (Tab. 4.2) und die damit verbundene geringe Wasserspeicherfähigkeit zurückzuführen.

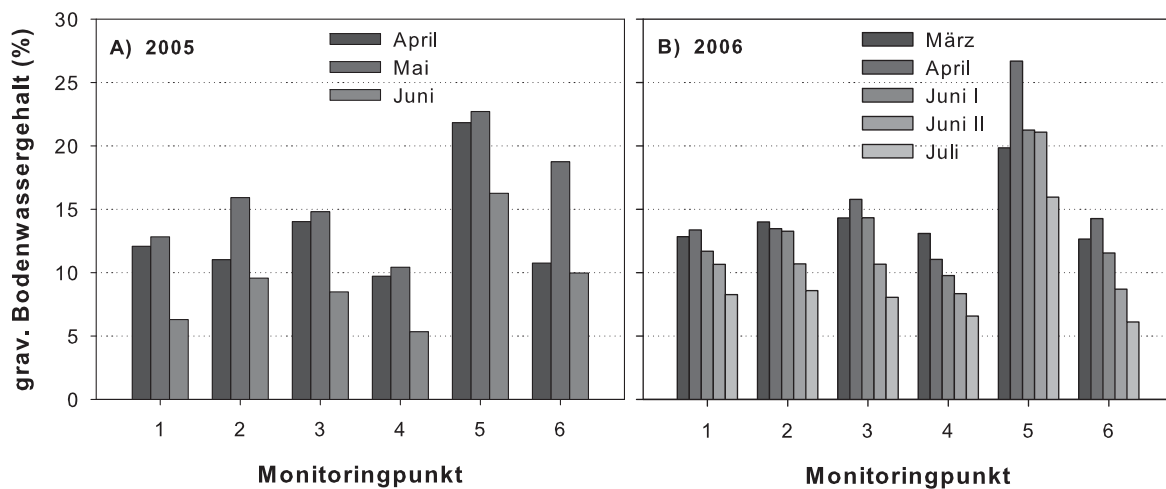


**Abb. 4.5: Volumetrischer Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen am Intensivmesspunkt 1 auf dem Schlag Finkenherd während der Vegetationsperiode in den Jahren 2005 (A) und 2006 (B)**

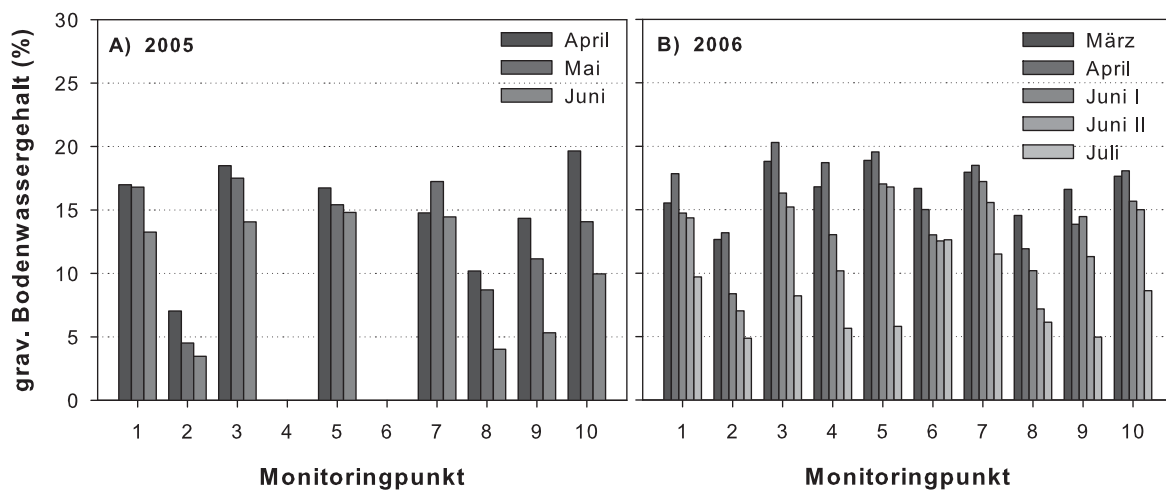


**Abb. 4.6: Volumetrischer Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen am Intensivmesspunkt 2 auf dem Schlag Finkenherd während der Vegetationsperiode in den Jahren 2005 (A) und 2006 (B)**

Anhand von Abb. 4.3 bis Abb. 4.8 sind auch die unterschiedlichen Austrocknungsdynamiken an den verschiedenen Monitoringpunkten der Versuchsschläge zu erkennen, die sich bezüglich der Monitoringpunkte des Schlags Finkenherd deutlicher unterscheiden als die des Schlags Rabenberg. Die geringere Dynamik am Standort Rabenberg ist vermutlich durch die im Untergrund vorkommenden Tone und deren Wasserspeicherfähigkeit bedingt.



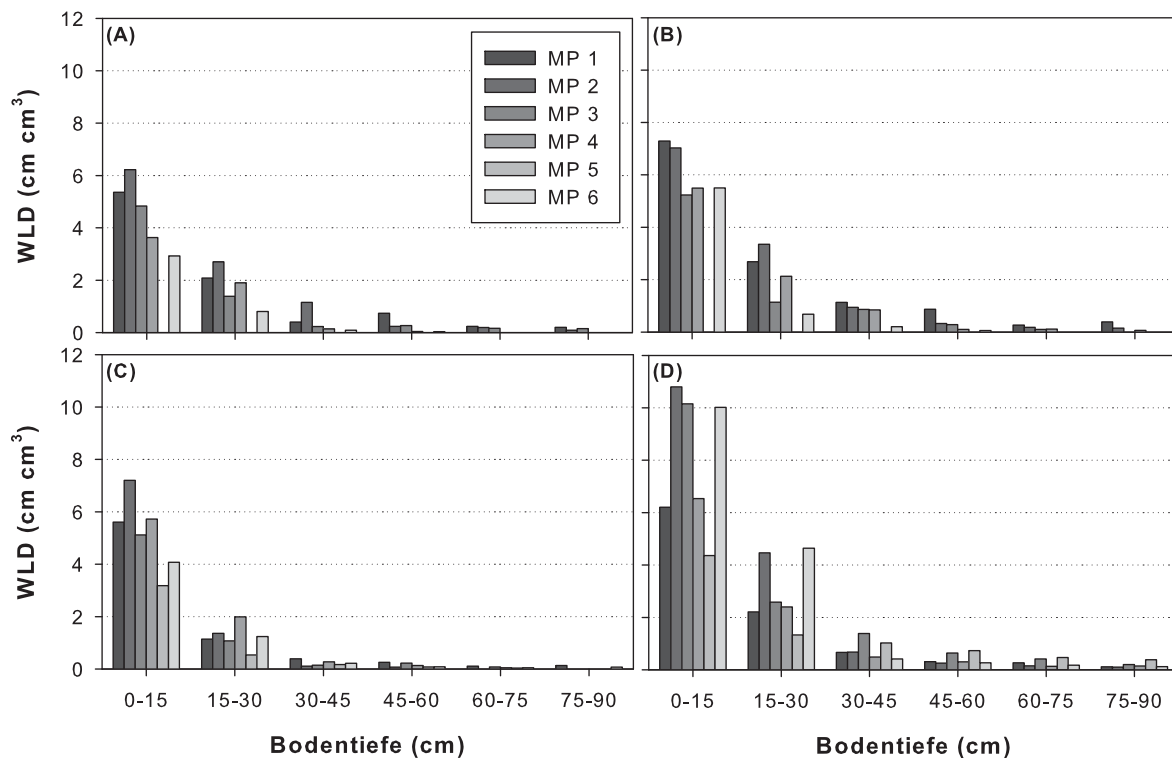
**Abb. 4.7:** Gravimetrischer Bodenwassergehalt auf dem Schlag Rabenberg an den unterschiedlichen Monitoringpunkten in den Jahren 2005 (A) und 2006 (B); dargestellt sind gewichtete Summen aus den Wassergehalten bis 100 cm Bodentiefe



**Abb. 4.8:** Gravimetrischer Bodenwassergehalt auf dem Schlag Finkenherd an den unterschiedlichen Monitoringpunkten in den Jahren 2005 (A) und 2006 (B); dargestellt sind gewichtete Summen aus den Wassergehalten bis 100 cm Bodentiefe

Die unterschiedlichen Bodenbedingungen an den beiden Versuchsstandorten, aber auch an den Monitoringpunkten der jeweiligen Versuchsschläge, wirken sich unterschiedlich auf die Durchwurzelung aus. Um die Ergebnisse der Wurzelbeprobungen zu den beiden Untersuchungsterminen Schossen und Blüte vergleichen zu können, sind die Daten zur Blüte für dieses Kapitel zum Teil nur bis 90 cm Tiefe ausgewertet und dargestellt worden.

Die ermittelten Wurzellängendichten zum Schossen und zur Blüte (Abb. 4.9 - Abb. 4.12) stimmen mit Werten zwischen  $0.3$  und  $10.8 \text{ cm cm}^{-3}$  im Oberboden ( $0 - 30 \text{ cm}$ ) sowie Null und  $3.0 \text{ cm cm}^{-3}$  im Unterboden ( $30 - 120 \text{ cm}$ ) gut mit Werten überein, die in anderen Studien für Winterweizen ermittelt wurden. SCHROETTER, ROGASIK, SCHNUG 2006 z. B. berichten

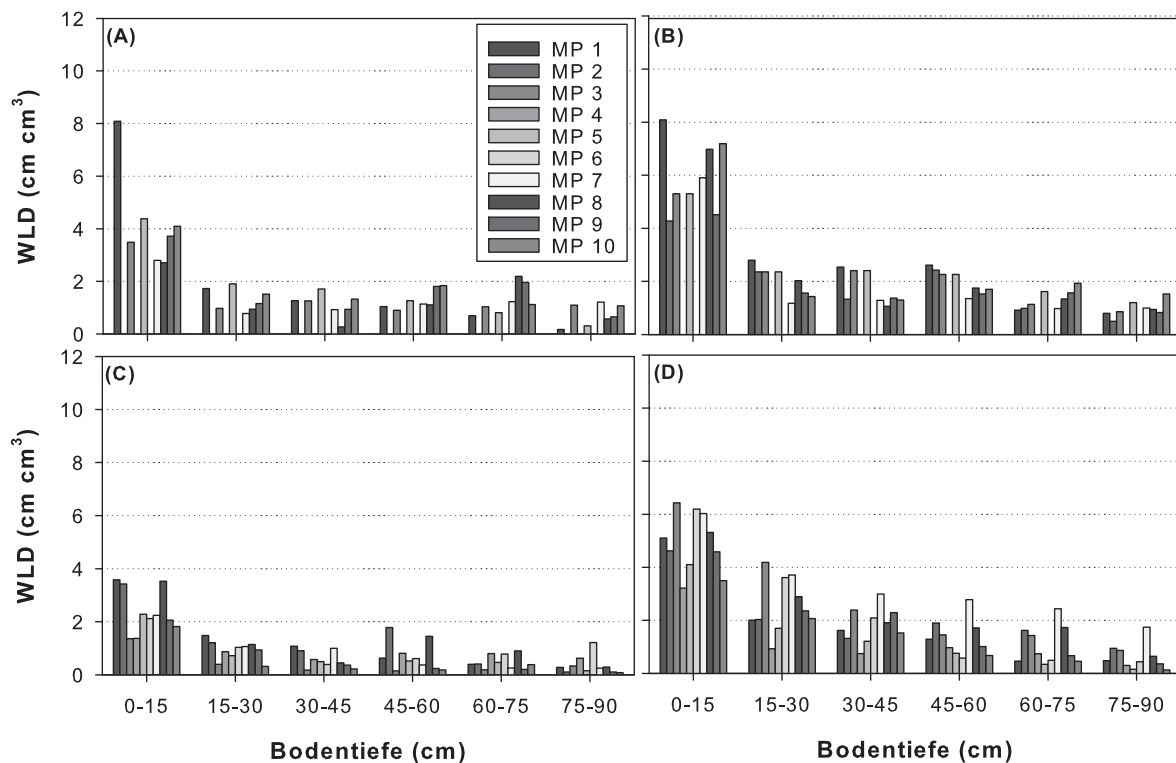


**Abb. 4.9: Wurzellängendichten (WLD) in unterschiedlichen Bodentiefen an den Untersuchungspunkten auf dem Schlag Rabenberg; Schossen 2005 (A), Blüte 2005(B), Schossen 2006 (C), Blüte 2006 (D); abgebildet sind Mittelwerte aus den drei Wiederholungen**

für Winterweizen zum Zeitpunkt der Blüte von Wurzellängendichten im Oberboden zwischen 6 und 9  $\text{cm cm}^{-3}$ , MANSKE, VLEK 2003 von Wurzellängendichten zwischen 2 und 10  $\text{cm cm}^{-3}$ , abhängig von der Bodentiefe. CHAUDHARY, BHATNAGAR 1980 ermittelten in einem Versuch mit Winterweizen in 0 - 30 cm Tiefe Wurzellängendichten zwischen 0.5 und 2  $\text{cm cm}^{-3}$  sowie in 60 - 90 und 120 - 150 cm Tiefe Werte zwischen 0.1 und 1.2  $\text{cm cm}^{-3}$  bzw. 0 - 0.7  $\text{cm cm}^{-3}$ . Die in einer Studie von ASSENG U. A. 1998 ermittelten Wurzel-längendichten von Winterweizen lagen im Oberboden zwischen 2 und 13  $\text{cm cm}^{-3}$  und in Tiefen von 30 - 60 cm zwischen 0 und 4  $\text{cm cm}^{-3}$ . Abb. 4.9 bis Abb. 4.12 zeigen, dass auf dem Versuchsschlag Rabenberg die Durchwurzelung zu den beiden Beprobungsterminen im Oberboden höher und im Unterboden niedriger ist als auf dem Schlag Finkenherd. Gründe dafür sind die bereits erwähnten Unterschiede in Bodendichte und Wasserstatus, die nachfolgend ausführlich diskutiert werden.

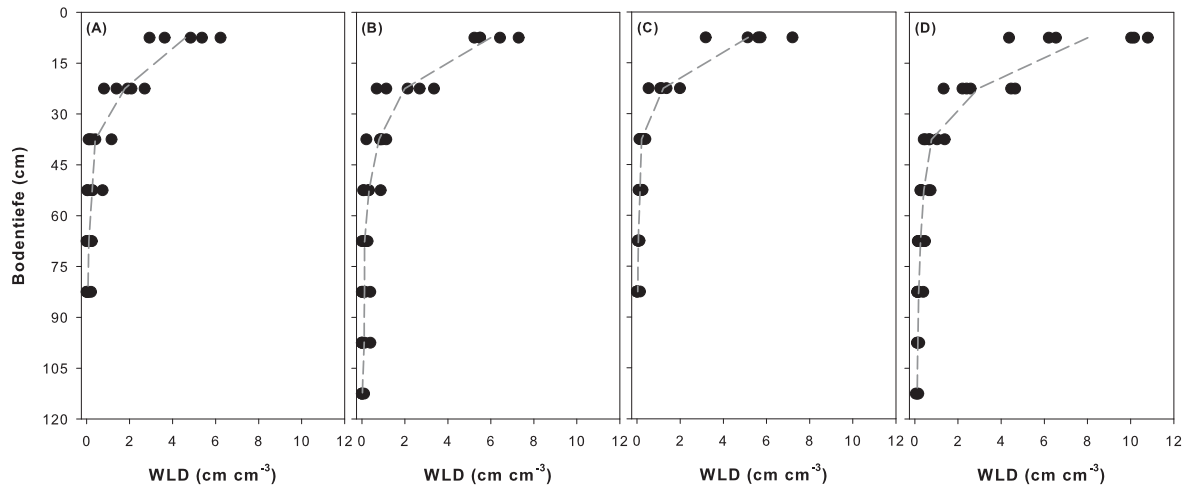
Zum Vergleich der Wurzellängendichten an den unterschiedlichen Monitoringpunkten zwischen den Beprobungsterminen bzw. den Untersuchungsjahren wurden Stichprobenvergleiche mit dem Wilcoxon-Rangsummentest durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.3, Abb. 4.13 und Abb. 4.14 dargestellt.



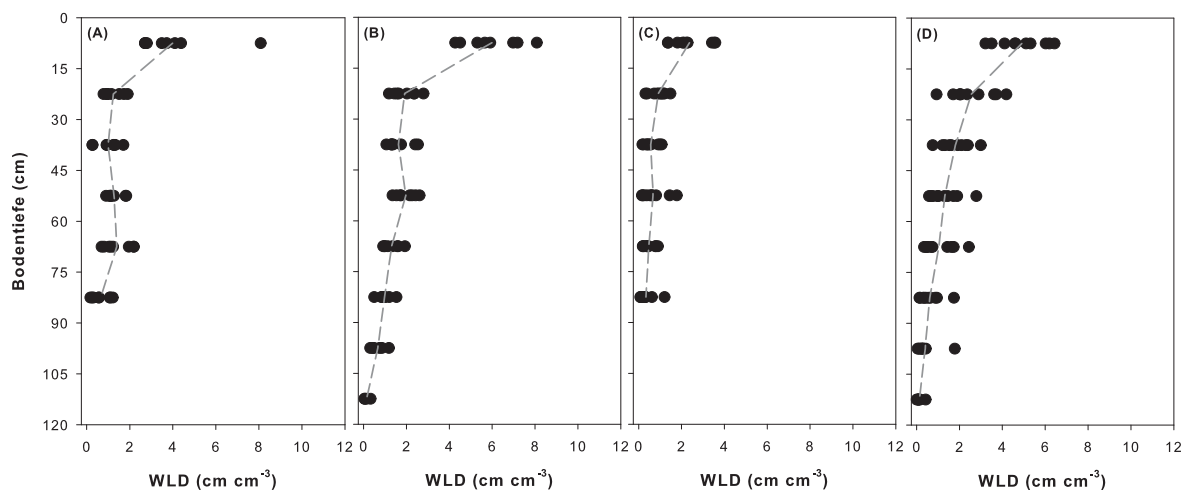


**Abb. 4.10: Wurzellängendichten (WLD) in unterschiedlichen Bodentiefen an den Untersuchungspunkten auf dem Schlag Finkenherd; Schossen 2005 (A), Blüte 2005(B), Schossen 2006 (C), Blüte 2006 (D); abgebildet sind Mittelwerte aus den drei Wiederholungen**

An den Messpunkten 2, 3 und 4 des Schlages Rabenberg traten über alle Bodentiefen gemittelt zwischen den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 keine signifikanten Unterschiede in der Wurzellängendichte auf (Abb. 4.13 A). Signifikante Unterschiede wurden an den Punkten 1 und 6 festgestellt, wobei die Wurzellängendichte an Punkt 1 im Untersuchungsjahr 2005 signifikant höher war als im Jahr 2006. An Punkt 6 hingegen trat der umgekehrte Fall auf. Signifikante Unterschiede zwischen den Wurzellängendichten zum Schossen und denen zur Blüte wurden im Untersuchungsjahr 2005 für die Punkte 1 und 4 ermittelt (Abb. 4.13 B). Im Jahr 2006 waren an allen Monitoringpunkten signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungszeitpunkten festzustellen (Abb. 4.13 C). Bezüglich des Schlages Finkenherd traten an den Monitoringpunkten 1, 5, 9 und 10 signifikante Unterschiede in der Wurzellängendichte zwischen den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 auf (Abb. 4.14 A): An diesen Punkten war die WLD im Untersuchungsjahr 2005 signifikant höher als im Jahr 2006. An den Punkten 3, 7 und 8 konnte kein Einfluss des Untersuchungsjahres ermittelt werden. Für die Punkte 2, 4 und 6 konnte dieser Vergleich nicht stattfinden, da im Jahr 2005 dort keine Daten erhoben werden konnten.



**Abb. 4.11: Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen an den Monitoringpunkten auf dem Versuchsschlag Rabenberg (Symbole) und deren Mittelwerte (Linie); Schossen 2005 (A); Blüte 2005 (B); Schossen 2006 (C) und Blüte 2006 (D)**



**Abb. 4.12: Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen an den Monitoringpunkten auf dem Versuchsschlag Finkenherd (Symbole) und deren Mittelwerte (Linie); Schossen 2005 (A); Blüte 2005 (B); Schossen 2006 (C) und Blüte 2006 (D)**

Über alle Bodentiefen gemittelt waren die Wurzellängendichten ebenfalls sowohl im Jahr 2005 als auch im Jahr 2006 an allen Monitoringpunkten zum Zeitpunkt der Blüte höher als zum Zeitpunkt des Schossens. Bis auf Monitoringpunkt 9 traten im Jahr 2005 an allen übrigen Punkten signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungszeitpunkten auf (Abb. 4.14 B). Signifikante Unterschiede zwischen den Untersuchungszeitpunkten konnten im Jahr 2006 an den Monitoringpunkten 1, 3, 7, 8, 9 und 10 festgestellt werden (Abb. 4.14 C). Zwischen den einzelnen Monitoringpunkten konnten bezüglich der über alle Bodentiefen gemittelten Wurzellängendichten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden (Tab. 4.4).

**Tab. 4.3:** Ergebnisse des Wilcoxon-Rangsummentests ( $\alpha = 0.05$ ) für die Vergleiche der Stichproben aus den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 bzw. der Stichproben von den Untersuchungszeitpunkten Schossen und Blüte 2005 und 2006 an den Monitoringpunkten der Versuchsschläge

<b>Rabenberg</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>				
<i>Vergleich</i>			<i>Signifikanz (p)</i>							
2005 - 2006	0.003	0.150	0.020	0.084	---	<0.001				
S05 – B05	0.006	0.162	0.456	0.045	---	0.286				
S06 – B06	0.010	<0.001	0.001	0.002	0.003	0.010				
<b>Finkenherd</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<i>Vergleich</i>			<i>Signifikanz (p)</i>							
2005 - 2006	<0.001	---	0.092	---	<0.001	---	0.122	0.873	0.004	<0.001
S05 – B05	0.004	---	0.006	---	0.015	---	0.034	0.003	0.140	0.048
S06 – B06	0.009	0.007	0.001	0.142	0.075	0.169	0.001	0.001	<0.001	0.001

Abb. 4.15 und Abb. 4.16 zeigen die Beziehung zwischen der Abnahme der Wurzellängendichte mit zunehmender Bodentiefe und Untersuchungszeitpunkten Schossen und Blüte bzw. den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 für die beiden Versuchsschläge Rabenberg und Finkenherd. Auf dem Schlag Rabenberg nahm die Wurzellängendichte über alle Untersuchungspunkte gemittelt mit zunehmender Bodentiefe signifikant ab (Abb. 4.15). Die Abnahme war im Untersuchungsjahr 2005 auf diesem Schlag etwas stärker ausgeprägt als im Jahr 2006 (Abb. 4.15 A). Die Abnahme der Wurzellängendichte zum Zeitpunkt des Schossens war über alle Untersuchungspunkte gemittelt in beiden Untersuchungsjahren stärker ausgeprägt als zum Zeitpunkt der Blüte (Abb. 4.15 B und C). Abb. 4.9 zeigt, dass auch an den einzelnen Untersuchungspunkten in beiden Jahren die Wurzellängendichte mit der Bodentiefe exponentiell abnimmt und an allen Punkten der größte Teil der Wurzeln im Oberboden, also in den oberen 30 cm, vorkommt. Auf dem Schlag Finkenherd nahm die Wurzellängendichte mit zunehmender Bodentiefe mit Ausnahme zum Zeitpunkt des Schossens im Jahr 2005 ebenfalls signifikant ab (Abb. 4.16). Über alle Untersuchungspunkte gemittelt war die Abnahme der Wurzellängendichte mit zunehmender Bodentiefe auf diesem Schlag im Gegensatz zum Schlag Rabenberg im Untersuchungsjahr 2005 schwächer ausgeprägt als im Jahr 2006 (Abb. 4.16 A). Die Abnahme der Wurzellängendichte war in beiden Untersuchungsjahren zum Zeitpunkt des Schossens im Gegensatz zum Versuchsschlag Rabenberg schwächer ausgeprägt als zur Blüte (Abb. 4.16 B und C). Abb. 4.10 zeigt deutlich, dass an einigen Untersuchungspunkten in beiden Jahren die Abnahme der Wurzellängendichte mit der Tiefe nicht so kontinuierlich verläuft, wie auf dem Versuchsschlag Rabenberg und dass auch in tieferen Bodenschichten noch relativ große Mengen an Wurzeln auftreten. Die signifikante Abnahme der Wurzellängendichte mit der Bodentiefe stimmt mit Ergebnissen von Untersuchungen an verschiedenen Gemüsepflanzen (GREENWOOD U. A. 1982) und Gräsern (REUTER 2006) überein und auch in diversen

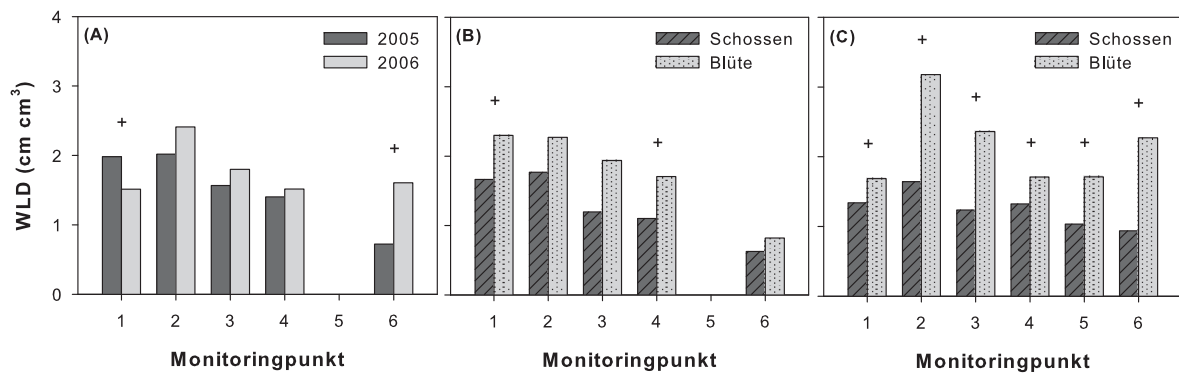


Abb. 4.13: Mittlere Wurzellängendichten (WLD) bis 0.9 m Tiefe an den unterschiedlichen Untersuchungspunkten auf dem Schlag Rabenberg; 2005 und 2006 (A), Schossen und Blüte 2005 (B), Schossen und Blüte 2006 (C); abgebildet sind Mittelwerte ( $n = 325$  bei A, 146 bei B, 179 bei C); die Kreuze kennzeichnen signifikante Unterschiede

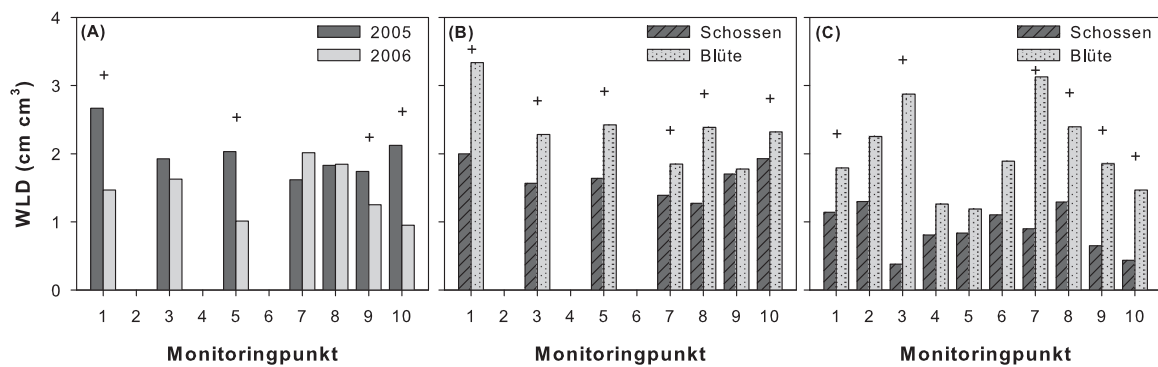
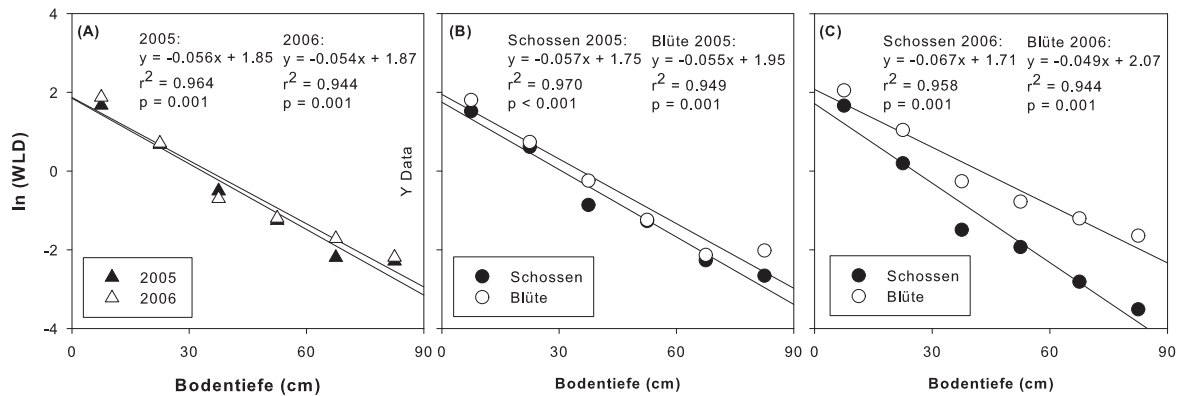


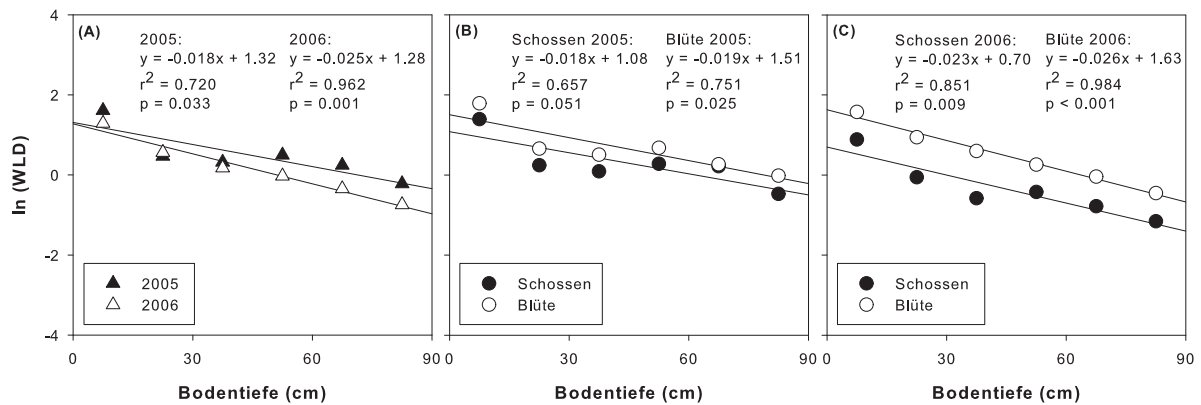
Abb. 4.14: Mittlere Wurzellängendichten (WLD) bis 0.9 m Tiefe an den unterschiedlichen Untersuchungspunkten auf dem Schlag Finkenherd; 2005 und 2006 (A), Schossen und Blüte 2005 (B), Schossen und Blüte 2006 (C); abgebildet sind Mittelwerte ( $n = 514$  bei A, 206 bei B, 308 bei C); die Kreuze kennzeichnen signifikante Unterschiede

Tab. 4.4: Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests ( $\alpha = 0.05$ ) für die Vergleiche der Stichproben von den verschiedenen Monitoringpunkten der Versuchsschläge in den Jahren 2005 und 2006

	Rabenberg		Finkenherd	
Jahr	<u>2005</u>	<u>2006</u>	<u>2005</u>	<u>2006</u>
Signifikanz (p)	0.385	0.985	0.863	0.221



**Abb. 4.15: Beziehung zwischen Abnahme der Wurzellängendichte (WLD) mit zunehmender Bodentiefe und den Untersuchungszeitpunkten Schossen und Blüte bzw. den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 für den Schlag Rabenberg; abgebildet sind Mittelwerte**



**Abb. 4.16: Beziehung zwischen Abnahme der Wurzellängendichte (WLD) mit zunehmender Bodentiefe und den Untersuchungszeitpunkten Schossen und Blüte bzw. den Untersuchungsjahren 2005 und 2006 für den Schlag Finkenherd; abgebildet sind Mittelwerte**

anderen Studien wurde eine Abnahme der Wurzellängendichte mit der Bodentiefe festgestellt (z. B. ASSENG U. A. 1998; EPHRATH, SILBERBUSH, BERLINER 1999; PHENE U. A. 1991). Als Ursachen für diese Abnahme mit der Tiefe werden zum einen geringere Gehalte an Nährstoffen und eine schlechtere Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen in tieferen Bodenschichten angesehen (FITTER 2003), zum anderen können die höheren Bodendichten in größerer Tiefe ein weiterer Grund sein (LABOSKI U. A. 1998; MONTAGU, CONROY, ATWELL 2001; TAYLOR, BRAR 1991). Der für den Schlag Rabenberg in beiden Untersuchungsjahren schwächere Tiefengradient zum Zeitpunkt der Blüte kann damit erklärt werden, dass bei geringerer bzw. sinkender Feuchte im Oberboden (wie z. B. im Sommer) die Durchwurzelung in tieferen Bodenschichten verstärkt wird (vgl. ENGELS, MOLENKOPF, MARSCHNER 1994; SCHROETTER, ROGASIK, SCHNUG 2006).

**Tab. 4.5: Prozentuale Anteile der Wurzeln im Ober- und Unterboden an den unterschiedlichen Monitoringpunkten der Versuchsschläge Rabenberg und Finkenherd**

<b>Rabenberg</b>														
Jahr	Punkt →	1	2	3	4	5	6					Min.	Max.	Mittel
2005	Oberboden	76.6	84.4	83.6	87.2	n.b.	95.9					76.6	95.9	85.5
	Unterboden	23.4	15.6	16.4	12.8	n.b.	4.1					4.1	23.4	14.5
2006	Oberboden	85.3	92.4	82.0	87.4	65.4	93.0					65.4	93.0	84.3
	Unterboden	14.7	7.6	18.0	12.6	34.6	7.0					7.0	34.6	15.8

<b>Finkenherd</b>														
Jahr	Punkt →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Min.	Max.	Mittel
2005	Oberboden	60.2	54.0	52.3	n.b.	49.1	n.b.	59.0	59.1	51.2	53.0	49.1	60.2	54.7
	Unterboden	39.8	46.0	47.7	n.b.	50.9	n.b.	41.0	40.9	48.8	47.0	39.8	50.9	45.3
2006	Oberboden	64.8	48.0	62.5	59.0	69.7	71.4	47.1	57.1	60.0	64.7	47.1	71.4	60.2
	Unterboden	35.2	52.0	37.5	41.0	30.3	28.6	52.9	42.9	40.0	35.3	28.6	56.9	39.8

Auf dem Versuchsschlag Finkenherd wurde hingegen in beiden Untersuchungsjahren ein etwas stärkerer Tiefengradient für den Beprobungszeitpunkt im Sommer als im Frühling ermittelt, wobei die Unterschiede zwischen den Gradienten jedoch äußerst gering bzw. im Untersuchungsjahr 2005 kaum vorhanden sind (Abb. 4.16 B und C). Die ermittelten Tiefengradienten für den Schlag Rabenberg sind deutlich höher als die für den Schlag Finkenherd (Abb. 4.15 und Abb. 4.16). Ein Vergleich der Wurzelanteile in Ober- und Unterboden und der Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen für die beiden Versuchsschläge zeigt, dass in beiden Untersuchungsjahren auf dem Versuchsschlag Rabenberg die Durchwurzelung im Unterboden wesentlich geringer ist als auf dem Schlag Finkenherd in Wulfen (Tab. 4.5 sowie Abb. 4.11 und Abb. 4.12). Auf dem Rabenberg liegen im Mittel ca. 85 % der gemessenen Wurzellängendichten im Oberboden (0 - 30 cm) und ca. 15 % im Unterboden (30 - 105 cm) vor. Am Standort Wulfen dagegen liegt dieses Verhältnis bei ca. 60:40. In der Literatur finden sich Angaben, dass bis zu 90 % der Gesamtwurzelbiomasse in den oberen 30 cm des Bodens vorliegen, wobei die oberen 10 cm die intensivste Durchwurzelung aufweisen, und dass die Wurzeldichte unterhalb 30 cm proportional mit der Bodentiefe abnimmt (SCHROETTER, ROGASIK, SCHNUG 2006). Diese Angaben passen eindeutig zu den Befunden für den Versuchsschlag Rabenberg (vgl. Abb. 4.9, Abb. 4.11 und Abb. 4.15 sowie Tab. 4.5). Für den Schlag Finkenherd treffen diese Aussagen nicht zu. Es liegt zwar auch hier der größere Anteil der Wurzeln im Oberboden vor, die Wurzellängendichte nimmt über alle Bodentiefen gemittelt jedoch nicht immer signifikant und auch nicht immer proportional mit zunehmender Tiefe ab (Abb. 4.10, Abb. 4.12 und Abb. 4.16 sowie Tab. 4.5). Eine Erklärung für die deutlichen Unterschiede zwischen den beiden

Standorten und die daraus resultierenden Unterschiede zwischen den Tiefengradienten könnte der Unterschied in den Niederschlagsmengen sein: In der Region Groß Twülpstedt (Versuchsschlag Rabenberg) sind die Niederschlagsmengen im langjährigen Mittel ca. 100 mm höher als in der Region Wulfen (Versuchsschlag Finkenherd), so dass zwischen den beiden Standorten generell ein deutlicher Unterschied bezüglich der Wasserversorgung im Oberboden besteht. Die Abnahme der Oberbodenfeuchte im Sommer führt in der Regel zu einer Erhöhung der Durchwurzelung im Unterboden (ENGELS, MOLENKOPF, MARSCHNER 1994; SCHROETTER, ROGASIK, SCHNUG 2006). Die Jahressummen der Niederschläge und Summen der Niederschläge in der Zeit von Beginn der Vegetationsperiode bis zur Blüte bestätigen diese Theorie für den Standort Finkenherd bei Wulfen jedoch nicht (Abb. 4.17). Im Jahr 2005 waren in Wulfen die Jahresniederschläge um 70 mm höher als die in Groß Twülpstedt, und die Niederschlagssummen in der Periode von Beginn der Vegetationszeit bis zur Blüte waren nahezu gleich hoch. Im Jahr 2006 unterschieden sich die Summen der Jahresniederschläge an den beiden Standorten so gut wie nicht und die Summe der Niederschläge von Beginn der Vegetationszeit bis zur Blüte war in Groß Twülpstedt um ca. 30 mm niedriger als in Wulfen. Auch die klimatischen Wasserbilanzen für diesen Zeitraum sowie für die Perioden bis zum Schossen und zwischen Schossen und Blüte können die Theorie nicht bestätigen (Abb. 4.18). Die Hauptgründe für die Unterschiede zwischen den beiden Versuchsschlägen bezüglich der Durchwurzelung des Unterbodens sind die Unterschiede im Wasserstatus und der Bodendichte. Wie in Kap. 2.3.2 beschrieben, ist der Schlag Rabenberg durch Juraton geprägt, die von glazialen Deckschichten unterschiedlicher Mächtigkeit überdeckt sind und die teilweise sogar bis an die Oberfläche anstehen (HERBST 2002), wobei der Wechsel zwischen Deckschichten und Ton meist zwischen 60 und 200 cm liegt. Das heißt, die Böden auf diesem Schlag sind durch Staunässe beeinflusst, so dass vorwiegend Pseudogleye und deren Subtypen auftreten. Da Staunässe sowohl das Wurzelwachstum als auch die Wurzelpenetration mindert (WATSON, LAPINS, BARRON 1976), ist die Durchwurzelung auf dem Rabenberg im Untergrund deutlich geringer als auf dem Finkenherd. CANNELL u. A. 1985 stellten in einer Lysimeterstudie mit Winterhafer fest, dass die totale Wurzellänge von Pflanzen unter Staunäseeinfluss ca. 77 % derer von Pflanzen ohne Staunäseeinfluss betrug und dass die Wurzellänge zur Blüte der staunässe-beeinflussten Varianten ca. 10 % geringer war als die der drainierten Varianten. Ähnliche Ergebnisse konnten sie für Versuche mit Winterweizen feststellen (CANNELL u. A. 1980 ). MALIK u. A. 2002 ermittelten in Gefäßversuchen mit Weizen eine Abnahme der relativen Wurzelwachstumsrate in Abhängigkeit von der Tiefe des Stauwassers von 15 - 74 %.

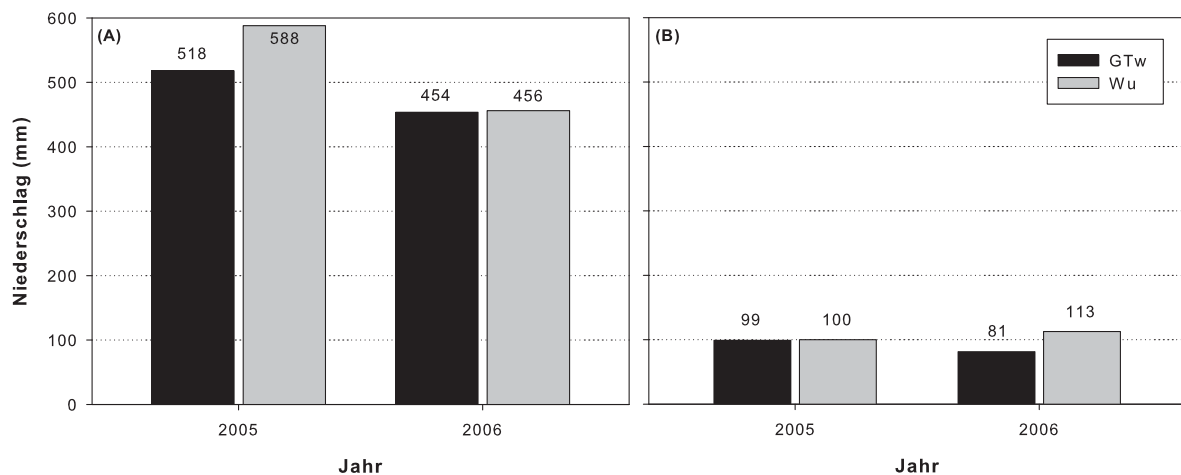


Abb. 4.17: Jahressummen der Niederschläge (A) sowie Summen der Niederschläge von Beginn der Vegetationszeit bis zur Blüte (B) in den Jahren 2005 und 2006 für die beiden Versuchsstandorte Groß Twülpstedt (GTw) und Wulfen (Wu)

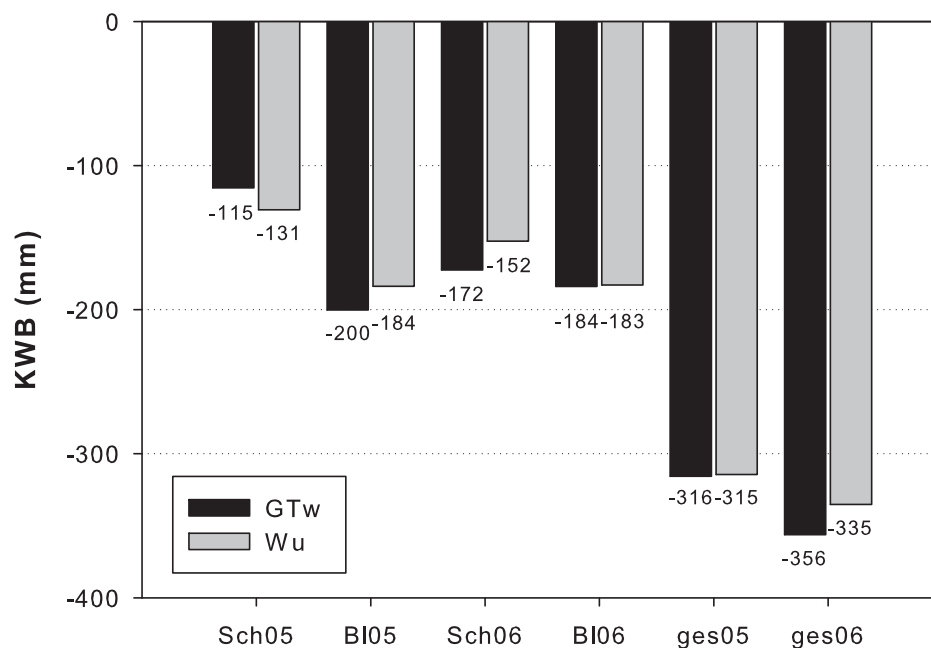
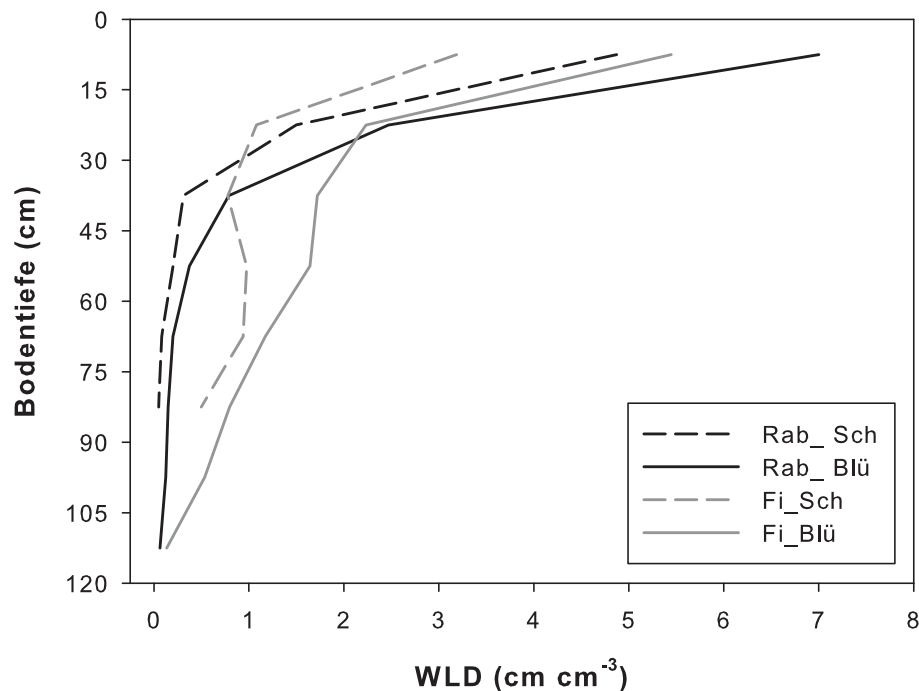


Abb. 4.18: Klimatische Wasserbilanz für die beiden Versuchsstandorte Groß Twülpstedt (GTw) und Wulfen (Wu) von Beginn der Vegetationszeit bis zum Schossen (Sch05; Sch06), vom Schossen bis zur Blüte (BI05; BI06) und von Beginn der Vegetationszeit bis zur Blüte (ges05; ges06) in den Jahren 2005 und 2006

Als weiterer Grund für die Unterschiede in der Unterbodendurchwurzelung auf den beiden Versuchsschlägen kann die Bodendichte herangezogen werden (vgl. LABOSKI U. A. 1998; MONTAGU, CONROY, ATWELL 2001; TAYLOR, BRAR 1991). An den Untersuchungspunkten auf dem Versuchsschlag Rabenberg sind sowohl die Trockenroh- als auch die Lagerungsdichten in der Tiefe von 30 - 60 cm um durchschnittlich  $0.2 \text{ g cm}^{-3}$  höher als auf dem Schlag





**Abb. 4.19:** Gesamtmittelwerte der Wurzellängendichten (WLD) in unterschiedlichen Bodentiefen für die Beprobungszeitpunkte Schossen und Blüte auf den Versuchsschlägen Rabenberg und Finkenherd

Finkenherd, was zu der vergleichsweise geringeren Durchwurzelung des Unterbodens auf dem Rabenberg beigetragen haben dürfte. Generell bewegen sich die Trockenroh- und Lagerungsdichten für den Schlag Rabenberg eher in hohen bis sehr hohen, auf dem Schlag Finkenherd dagegen in mittleren bis hohen Bereichen (Tab. 4.1 und Tab. 4.2).

Beim Vergleich der Gesamtmittelwerte der WLD für die beiden Versuchsschläge ist zu sehen, dass die WLD in den oberen 15 cm des Bodens auf dem Rabenberg sowohl zum Zeitpunkt Schossen als auch zur Blüte deutlich höher ist als auf dem Finkenherd (Abb. 4.19). Diese Tatsache lässt sich ebenfalls durch die Effekte der Staunässe erklären. CANNELL U. A. 1985 stellten fest, dass das Wurzelwachstum bei den staunässebeeinflussten Varianten in den oberen 10 cm des Bodens größer war als das der drainierten Varianten. Sie erklärten dies damit, dass unter Staunässebedingungen vermutlich mehr Nodalwurzeln (sprossbürtige Wurzeln) gebildet werden. Unter schlechter belüfteten Bedingungen können diese Wurzeln Aerenchymgewebe ausbilden und so eine ausreichende pflanzeninterne Sauerstoffdiffusion von oberirdischen Pflanzenteilen gewährleisten, so dass die Wurzeln in der Lage sind, einige Zentimeter in anaerobe Bereiche hinein zu wachsen (TROUGHT, DREW 1980). MALIK U. A. 2002 berichten ebenfalls von einem Anstieg der sprossbürtigen Wurzeln, der je nach Tiefe des Stauwassers bis zu 1.5-mal höher war als bei den Kontrollvarianten.

Bei Betrachtung von Abb. 4.19 ist ebenfalls ersichtlich, dass auf dem Schlag Rabenberg die Wurzellängendichte kontinuierlich mit der Bodentiefe abnimmt und dass auf dem Finkenherd hingegen im Bereich von ca. 45 - 60 cm Bodentiefe noch einmal ein Anstieg der Wurzellängendichte zu erkennen ist. Messungen des Durchdringungswiderstandes zeigen an den meisten Monitoringpunkten auf dem Finkenherd im Gegensatz zum Rabenberg einen Anstieg desselben in ca. 30 - 40 cm Bodentiefe, was auf eine alte Pflugsohle schließen lässt (M. Sommer, pers. Kommun.). Die Pflanzen verstärken also offenbar noch einmal das Wurzelwachstum, wenn sie diese Zone erhöhten Durchdringungswiderstandes durchwachsen haben, was eine weitere Erklärung für die im Vergleich zum Schlag Rabenberg höhere Durchwurzelung des Unterbodens wäre. Außerdem können damit auch die für diesen Schlag festgestellten, stärkeren Tiefengradienten zum Beprobungszeitpunkt Schossen im Vergleich zur Blüte erklärt werden (Abb. 4.16 B und C).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich die in der Literatur zu findenden Angaben bezüglich der Einflüsse verschiedener Standortbedingungen auf das Wurzelsystem von Nutzpflanzen für die Versuchsstandorte Groß Twülpstedt und Wulfen generalisieren lassen. Die unterschiedlichen Standortbedingungen und damit auch unterschiedlichen Wachstumsbedingungen wirken sich deutlich auf die Durchwurzelung an den beiden Versuchsstandorten aus, wobei die Unterschiede in der Durchwurzelung in erster Linie auf unterschiedliche Wasserstati sowie Bodendichten bzw. Durchdringungswiderstände zurückzuführen sind.

## **5 Modellierung der Effekte von standortspezifischen und zeitlichen Variationen des Bodenwassergehaltes auf das Wurzelwachstum von Winterweizen mit dem Modell CERES-Wheat**



## 5.1 Einleitung

Ungefähr ein Viertel der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland wird für den Weizenanbau genutzt (STATISTISCHES BUNDESAMT 27.05.2005). Die Anbaufläche und den Ertrag von Winterweizen betreffend, gehören Sachsen-Anhalt und Niedersachsen zu den führenden Bundesländern in Deutschland. Besonders in Sachsen-Anhalt tritt häufig eine negative Wasserbilanz während der Vegetationsperiode auf (ZEBISCH U. A. 2005). Die Wasserverfügbarkeit beeinflusst zahlreiche physiologische Prozesse und ist daher der entscheidende Faktor, der das Wachstum und die Ertragsbildung von Weizen beeinflusst (ATWELL, KRIEDEMANN, TURNBULL 1999; HAY 1999). Da Pflanzenbestände hoch adaptive Systeme sind, ist die Anpassung der Bestandesführung an Schwankungen der Bodenwasserverfügbarkeit und des Klimas oft schwierig zu bewerkstelligen. Pflanzenmodelle sind potenziell dazu in der Lage, die komplexen Reaktionen der Pflanzen auf Änderungen in ihrer physikalischen, chemischen und biologischen Umwelt widerzuspiegeln (WALLACH, MAKOWSKI, JONES 2006). Sie können potenziell als Vorhersage- und Entscheidungsinstrumente genutzt werden, um das Bestandesmanagement zu optimieren und an diese schwankenden Bedingungen anzupassen. Das Decision Support System for Agricultural Technology Transfer (DSSAT) gehört zu dieser Gruppe von Modellen und wurde entwickelt, um Managemententscheidungen in der landwirtschaftlichen Praxis zu unterstützen und Zeit, Unsicherheiten und menschliche Ressourcen einzusparen, die für die Analyse dieser komplexen, wechselnden Entscheidungen nötig sind (TSUJI, HOOGENBOOM, THORNTON 1998; JONES U. A. 2003b). CERES-Wheat ist Bestandteil von DSSAT und hat eine lange Entwicklungsgeschichte und wurde erfolgreich in unterschiedlichen Teilen der Welt und unter einer großen Bandbreite von Umweltbedingungen angewandt (OTTER-NACKE 1986; RITCHIE, GODWIN, OTTER-NACKE 1988; PORTER, JAMIESON, WILSON 1993; JAMIESON U. A. 1998; SAVIN, HALL, SATORRE 1994; TSUJI, HOOGENBOOM, THORNTON 1998; GHAFARI, COOK, LEE 2001; JONES U. A. 2003a; TIMSINA, HUMPHREYS 2006). Die Dauer des Wachstums, Biomasseakkumulation, Sink-Source-Verteilung und Ertrag werden in dem Modell basierend auf einem empirischen Konzept simuliert (RITCHIE, GODWIN, OTTER-NACKE 1988). Unterschiedliche Studien zeigten, dass die Vorhersagequalität von CERES-Wheat durch Schwankungen des Niederschlags stark beeinflusst wird (z. B. HEINEMANN, HOOGENBOOM, CHOJNICKI 2002; LANGENSIEPEN U. A. 2008; SARKAR, KAR 2008). Diese wirken sich auf die Berechnung der Bodenwasserverteilung, der Wurzellängendichte und der Reaktion der Pflanzen auf Wasserstress aus (RITCHIE 1998), deren Ausmaß mathematisch abhängig von Änderungen in den berechneten Wurzellängendichten ist. Die simulierten

Wurzellängendichten korrelieren wiederum mit der simulierten Bodenwasserverteilung (RITCHIE, GODWIN, OTTER-NACKE 1988). Wurzelwachstum bestimmt in starkem Maße, mit welcher Rate Pflanzen Nährstoffe und Wasser für das Wachstum und die Ertragsbildung nutzen (LAMBERS, CHAPIN, PONS 2008). Um die Vorhersagequalität von CERES-Wheat zu prüfen, ist daher eine Validation der Berechnung der Bodenwasserverteilung sowie der Effekte der Wasserverteilung auf die Simulation der Wurzellängendichten erforderlich. Die Variabilität der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften innerhalb eines Schlages hat maßgeblichen Einfluss auf die Berechnungen von Biomasse und Ertrag, weshalb eine hohe Vorhersagequalität und genaue, hoch qualitative Eingangsdaten wichtige Voraussetzungen für eine erfolgreiche Anwendung des Modells sind - vor allem im Zusammenhang mit Präzisionslandwirtschaft. Das nützliche Potenzial von Modellen als Entscheidungsunterstützungssystem kann nur vollständig ausgeschöpft werden, wenn diese beiden Voraussetzungen gegeben sind.

Ziel war es, durch die Analyse der Effekte von standortspezifischen und zeitlichen Änderungen des Bodenwassergehaltes auf die Simulation des Wurzelwachstums die Wurzel- und Bodenwasseroutine des Modells CERES-Wheat zu überprüfen.

## **5.2 Material und Methoden**

### **5.2.1 Eingangsdaten für die Modellierung**

Für diese Arbeit wurde die Version 4.5 des Modells CERES-Wheat genutzt. Die meteorologischen Daten stammen aus der MARS-Datenbasis des Joint Research Centre der Europäischen Kommission (JRC). MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing) liefert regionalisierte Wetterdaten, die auf interpolierten Daten verschiedener Wetterstationen der entsprechenden Region basieren. Da Klimadaten grundsätzlich starken kleinräumigen Schwankungen unterliegen, können die MARS-Daten nur einen Überblick über die tatsächlich vorherrschenden Verhältnisse auf den Betrieben geben. Da Schwankungen der Niederschläge die Vorhersagequalität des Modells stark beeinflussen, stellen die verwendeten MARS-Daten zwangsläufig eine Unsicherheit bezüglich der Simulationen dar und müssen kritisch betrachtet werden. Aus diesem Grund wurde eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt, indem die Niederschlagsmenge stufenweise (jeweils immer um 10%) von -70 bis +130 % verändert wurde.

Die Bodendaten stammen aus Feld- und Laboruntersuchungen, die im Rahmen des Forschungsverbundprojektes *preagro II* durchgeführt wurden. Die Textur wurde mit einer

Kombination aus Schlämmanalyse (Sandfraktionen) und Pipettmethode nach KÖHN (Schlufffraktionen und Ton), die Bodendichte mit 100cm<sup>3</sup>-Stechzylindern bestimmt (siehe auch Kap. 4.2.4).

Die Ableitung der Kennwerte des Bodenwasserhaushaltes (LL – permanenter Welkepunkt, DUL - Feldkapazität, SAT - Sättigung, SKS – gesättigte Wasserleitfähigkeit) für die einzelnen Bodenschichten erfolgte nach KA5 (Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage).

Die genetischen Koeffizienten für die Winterweizensorten Cubus, Tommi und Ritmo wurden mit der Software GENCALC (HUNT U. A. 1993) ermittelt.

Die Simulationen für die beiden Versuchsschläge Finkenherd und Rabenberg erfolgten jeweils für die Jahre 2005 und 2006.

### 5.2.2 Das DSSAT-Modell

In der verwendeten DSSAT-Version basiert das CSM (Cropping System Model) auf einer modularen Modellstruktur (Abb. 5.1). Bodenwasser-, Stickstoff- und Kohlenstoffdynamik werden im CSM simuliert, während Pflanzenwachstum und -entwicklung je nach Feldfrucht mit den Modulen CROPGRO, CERES oder SUBSTOR simuliert werden. Die Modelle der CERES-Familie wurden für die Simulation des Wachstums verschiedener Getreidearten entwickelt. Neben dem Modell CERES-Wheat, das im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde und mit dem das Wachstum von Weizen simuliert wird, existieren innerhalb von DSSAT in der CERES-Familie weitere Modelle zur Simulation von Mais, Gerste und Hirse.

Da CERES-Wheat und seine Struktur in diversen Veröffentlichungen beschrieben wurden (z. B. GODWIN U. A. 1989; HOOGENBOOM U. A. 2003; JONES U. A. 2003a; RITCHIE, OTTER 1985) wird hier nur eine Übersicht gegeben. Eine Ausnahme bilden das Boden-wassermodell und die Wurzelwachstumsroutine, die für diese Arbeit eine besondere Rolle spielen und daher ausführlicher beschrieben werden.

Für die Simulation müssen verschiedene Inputfiles zusammengestellt werden, die Informationen über Experiment, Standort, Boden, Klima und Genotyp enthalten.

Der *Experimentaldatafile* enthält Informationen, die für die Simulationen verschiedener Behandlungen nötig sind. Dies sind z. B. Lage des Experiments, Saatzeitpunkt oder Beregnung sowie Informationen über die vorherrschenden Bedingungen, wie u. a. Ergebnisse von Bodenanalysen, Pflanzenzahlen, Beregnungs-, Dünge- und Erntemanagement oder Anfangsbedingungen bezüglich des Bodens.

Der *Wetterfile* enthält Wetterdaten wie Maximum- und Minimumtemperatur, Niederschlag, Sonneneinstrahlung oder auch Windgeschwindigkeit und photosynthetisch aktive Strahlung.

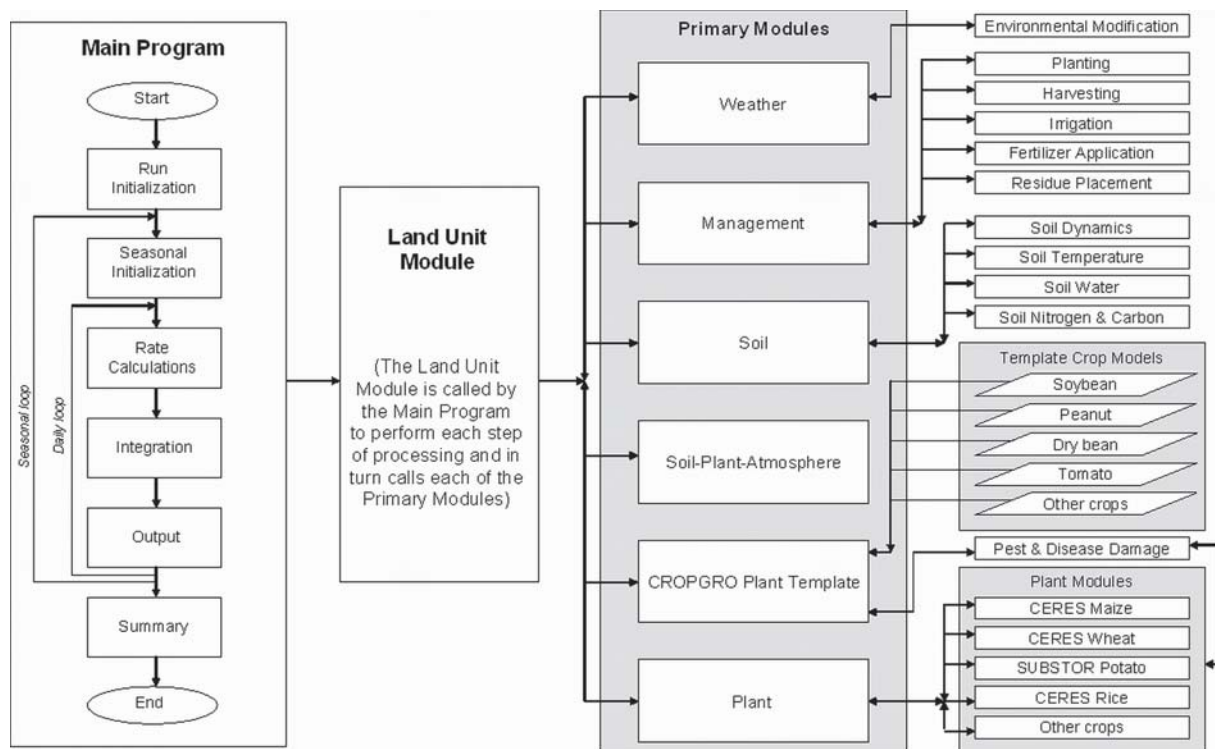


Abb. 5.1: Übersicht über die Komponenten und die modulare Struktur des DSSAT-CSM (JONES U. A. 2003a )

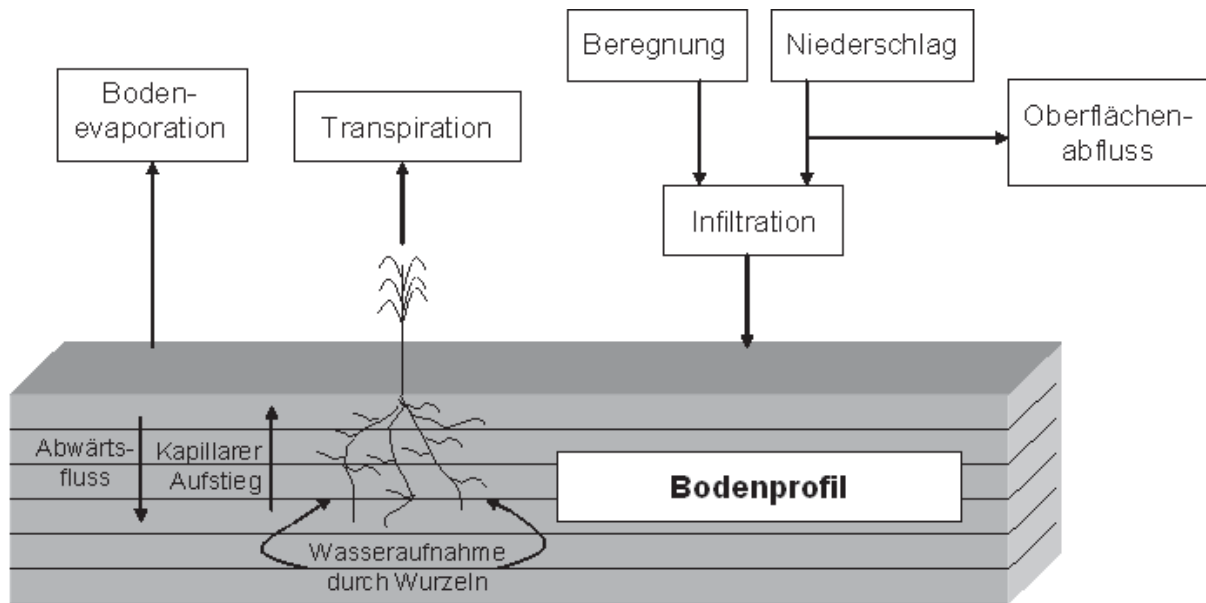
Im *Bodenfile* werden für jede Bodenschicht deren jeweilige Mächtigkeit sowie chemische und physikalische Eigenschaften und sonstige Bodeninformationen hinterlegt.

Der *Genotypdatenfile* beinhaltet sortenspezifische genetische Parameter bezüglich Vernalisation, Photoperiode, Kornfüllungsdauer sowie Kornzahl und -größe, Trockengewicht eines Stängels und Blattentwicklungsdauer. Die Anpassung dieser Koeffizienten an die jeweiligen spezifischen Bedingungen erfolgt über eine rekursive Parameteranpassung mit der im Modell enthaltenen Software GENCALC.

Das Modell simuliert phänologische Entwicklung, Biomasseakkumulation und -partitionierung, Blattflächenindex, Wurzel-, Halm- und Blattwachstum sowie die Bodenwasser- und Stickstoffbilanz auf täglicher Basis. Im *Outputfile* ist eine Übersicht aller eingegebenen Informationen (s. o) sowie ausgewählter Simulationsergebnisse enthalten, wie z. B. Pflanzen- und Bodenstatus zu den Hauptentwicklungsstadien, zeitliche Verteilung der Bestandesvariablen oder Bodenwasser.

Das eindimensionale *Bodenwassermodell* (RITCHIE 1998) berechnet auf täglicher Basis alle Prozesse, die den Wassergehalt im Bodenprofil direkt beeinflussen (Abb. 5.2). Die täglichen Wassergehaltsänderungen in jeder Bodenschicht werden unter Berücksichtigung von Niederschlag und Beregnung, vertikalem Wasserfluss, Wasserbewegung im ungesättigten Bereich, Evaporation und Wasseraufnahme durch die Pflanzenwurzeln berechnet.





**Abb. 5.2: Im Bodenwasser- und Soil-Plant-Atmosphere interface Modul modellierte Prozesse (verändert nach JONES U. A. 2003a )**

Für die Berechnung der Abwärtsbewegung von Bodenwasser nutzt das Modell den sogenannten wassergehalts-getriebenen „tipping bucket“-Ansatz. Das heißt, abwärtsgerichteter Wasserfluss aus einer Bodenschicht findet dann statt, wenn der Bodenwassergehalt in der Schicht zwischen Sättigung und nutzbarer Feldkapazität liegt. Die Aufwärtsbewegung von Wasser im ungesättigten Bereich wird durch eine konservative Schätzung des Diffusionsvermögens von Bodenwasser und über Unterschiede im volumetrischen Wassergehalt aneinandergrenzender Schichten berechnet (RITCHIE 1998). Die Infiltration je Tag wird berechnet, indem der Oberflächenabfluss vom Niederschlag, der an diesem Tag auftritt, subtrahiert wird. Die Partitionierung von Niederschlag in Oberflächenabfluss und Infiltration basiert auf dem „curve number“-Ansatz des United States Department of Agriculture für geschichtete Böden, der die Feuchteverhältnisse der oberflächennahen Bodenschichten sowie Textur, Neigung, Saatmethode und den Bodenwassergehalt zu dem Zeitpunkt, an dem Niederschlag auftritt, berücksichtigt (WILLIAMS, JONES, DYKE 1984). Die Versickerung des Wassers im Boden wird zunächst basierend auf einem allgemeinen Dränparameter kalkuliert, der über die Tiefe als konstant angenommen wird. Die Menge an Wasser, die jede Schicht durchfließt, wird dann mit der gesättigten Leitfähigkeit der jeweiligen Schicht verglichen. Wenn die gesättigte Leitfähigkeit einer Schicht geringer ist als die für die Schicht kalkulierte vertikale Versickerung, wird die aktuelle Versickerung auf den Leitfähigkeitswert limitiert und Wasser sammelt sich oberhalb der Schicht an. Evaporation und Wasseraufnahme durch Pflanzenwurzeln aus den

verschiedenen Bodenschichten werden in einem anderen Modul (Soil-plant-atmosphere interface module) berechnet und sind mit dem Bodenwassermodul verknüpft. Der Bodenwassergehalt in jeder Schicht wird täglich aktualisiert, indem der tägliche Wasserfluss in oder von einer Bodenschicht in Abhängigkeit von den beschriebenen Prozessen addiert oder subtrahiert wird.

Das *Stickstoff- und Kohlenstoffmodell* (GODWIN, SINGH 1998), simuliert die Prozesse, die bei der Umsetzung der organischen Substanz im Boden ablaufen: Mineralisation und Immobilisation, Nitrifikation und Denitrifikation, Nitrat- und Harnstoffflüsse, Verflüchtigung von Ammonium, Stickstoffaufnahme durch Pflanzenwurzeln und Verlagerung in die verschiedenen Pflanzenorgane. Die meisten der für dieses Modul benötigten Eingangsdaten werden im Bodenwasser- und Bodentemperaturmodul berechnet. Der Transport von mobilem Stickstoff über die verschiedenen Bodenschichten ist dabei abhängig vom Wasserfluss, der über das oben beschriebene Bodenwassermodell berechnet wird. Die einzige Eingangsvariable, die im Pflanzenmodul berechnet wird, ist die tägliche Menge an abgestorbener Pflanzenbiomasse (oberirdische und unterirdische), die der Bodenoberfläche bzw. den jeweiligen Bodenschichten zugerechnet wird.

Das Wasser- und auch das Stickstoffmodell schätzen über Stressfaktoren (SWDF1 und SWDF2 sowie NDEF1, NDEF2 und NDEF3) Vorwärtskopplungseffekte auf das Pflanzenwachstum und die Entwicklung ab. Die Faktoren und deren Einflüsse werden im Folgenden aufgelistet.

SWDF1	→	Transpiration und Photosynthese
SWDF2	→	Blattwachstum, Verzweigung, Bestockung
NDEF1	→	Photosynthese
NDEF2	→	Blattwachstum, Alterung und Partitionierung
NDEF3	→	N-Gehalt im Korn

Die Beziehungen zwischen diesen Stressfaktoren und der Pflanzenreaktion sind dabei für die Faktoren SWDF1 und SWDF2 sowie NDEF1 und NDEF3 linear, für den Faktor NDEF2 nicht linear (RITCHIE 1998).

Das *Pflanzenwachstumsmodell* simuliert von der Aussaat bis zur Ernte eine phasenweise Entwicklung mit neun Wachstumsstadien. Die Dauer der einzelnen Phasen ist abhängig von der Temperatur und sortenspezifischen Ansprüchen an die Temperatursumme (growing-degree days).

Die Growing-degree days (*GDD*) werden berechnet, indem minimale und maximale Tagesmitteltemperaturen ( $T_{min}$ ;  $T_{max}$ ) mit einer Basistemperatur ( $T_{base}$ ; üblicherweise 10°C) verglichen werden:

$$GDD = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base}$$

Das Modell nutzt für die Biomasseakkumulation das Konzept der Strahlungsnutzungseffizienz, das eine lineare Beziehung zwischen der kumulativen absorbierten Solarstrahlung und der Kohlenstoffassimilation herstellt (RITCHIE U. A. 1998). Die tägliche absorbierte photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) wird hierbei über einen feldfruchtspezifischen Parameter für die Strahlungsnutzungseffizienz in Trockenmasse umgerechnet. Für Weizen wird im CERES-Modell eine Strahlungsnutzungseffizienz von 2.6 - 4.0 g MJ<sup>-1</sup> angenommen. Die im Modell angenommenen RUE-Werte sind im Vergleich zu gemessenen Werten, die sich für Weizen normalerweise in Bereichen um 1.5 g MJ<sup>-1</sup> bewegen, sehr hoch. Laut RITCHIE U. A. 1998 wurden die Werte höher angesetzt, um Biomasseverluste im Wurzelsystem zu kompensieren, die durch Wurzelrespiration, -exsudation und -tod entstehen, so dass ein angemessenes Wurzelsystem für die Wasser- und Nährstoffaufnahme simuliert werden kann. Die Lichtabsorption wird als Funktion von Blattflächenindex, Pflanzenpopulation und Reihenabstand berechnet. Das Wachstum der einzelnen Pflanzenorgane ist abhängig vom potenziellen Organwachstum, wobei das effektive Wachstum durch Temperatur sowie Wasser- und Stickstoffverfügbarkeit limitiert wird. Anzahl der entstehenden Blätter, Dauer der Kornfüllung und der Ertrag als Produkt aus Korn- und Pflanzenzahl sowie Korngewicht sind Funktionen der im Genotypfile festgelegten genetischen Parameter.

Die *Entwicklung des Wurzelsystems* wird in CERES-Wheat folgendermaßen berechnet: Während der gesamten Pflanzenentwicklung wird unter Berücksichtigung von Wurzelexsudation und Ablösung sowie Respiration ein bestimmter Teil der Assimilate dem Wurzelwachstum zugeteilt. Da die oberirdische Biomasseentwicklung im Modell Priorität hat, wird am Ende jedes Tages der Kohlenstoff, der nicht für die oberirdische Biomasseentwicklung benötigt wurde, dem Wurzelwachstum zugeteilt (abhängig vom Pflanzenwachstumsstadium mind. 10 - 35 %, jedoch maximal 60 %). Die so erhaltene Wurzelmasse wird unter der Annahme, dass die Wurzeln im Boden gleichmäßig verteilt sind, über einen Umrechnungsfaktor (GREGORY U. A. 1978) in Wurzellänge umgewandelt. Die Wurzeltiefe wird berechnet, indem die Abwärtsbewegung der Wurzeln unter optimalen Bedingungen als proportional zum täglichen Temperatursummenanspruch (*GDD*) angenommen wird. Nicht optimale Bedingungen sind beispielsweise trockener Boden in dem

Bereich, in den die Wurzeln hineinwachsen, oder Wasserstress für die Pflanze. Die entsprechenden Wasserstressfaktoren sind in der Bodenwasseroutine festgelegt und werden relevant, wenn das pflanzenverfügbare Bodenwasser unter einen Wert von 25 % fällt. Unter stresslosen Bedingungen wird die Rate für das Abwärtswachstum mit 0.22 cm/degree-day angenommen. Die Verteilung der Wurzeln innerhalb einer Bodenschicht wird über einen relativen Wurzellängendichtefaktor für jede Schicht, in der die Wurzeln wachsen, geschätzt. Dieser Faktor repräsentiert die relative Präferenz für Wurzelwachstum in verschiedenen Bodentiefen, solange Bodenwasser- und Nährstoffgehalt nicht unter bestimmte Grenzwerte fallen. Er ist abhängig von den Eigenschaften des Bodens und wird im Bodenfile entweder vom Modell automatisch berechnet oder kann vom Nutzer entsprechend modifiziert werden, wie es für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen der Fall war. Um die Verteilung neuer Wurzeln in der Tiefe zu erhalten, wird bis zur unteren Grenze der Wurzelzone unter Berücksichtigung von Stickstoff- und Wasserstressfaktoren für jede Schicht der effektive Wurzellängendichtefaktor berechnet. Die Summe dieser Faktoren aller Bodenschichten ergibt einen totalen Wurzellängendichtefaktor. Die Fraktion neuer Wurzeln in jeder Bodenschicht wird über den Quotienten aus dem tatsächlichen Wurzellängendichtefaktor jeder Schicht und dem totalen Faktor berechnet. Die Wurzellängendichte für jede Bodenschicht wird unter Berücksichtigung von absterbenden Wurzeln sowie Ablösungs- und anderen Prozessen aktualisiert und in cm Wurzellänge je cm<sup>3</sup> Boden angegeben.

Im *Soil-Plant-Atmosphere interface Modul* werden auf täglicher Basis Lichtabsorption durch den Bestand, potentielle Evapotranspiration, aktuelle Bodenevaporation und Pflanzentranspiration sowie die Wasseraufnahme durch Pflanzenwurzeln in jeder Bodenschicht berechnet (Abb. 5.2). Zur Berechnung der potenziellen Evapotranspiration können verschiedene Ansätze gewählt werden. Für die durchgeführten Simulationen wurde die Penman-Monteith-Referenzmethode (FAO56) verwendet. Die Berechnung der aktuellen Evaporation basiert auf einem zweistufigen Prozess nach RITCHIE (1972). Wenn die aktuelle Evaporation geringer ist als die potenzielle, wird die bestehende Differenz zur potenziellen Transpiration hinzuaddiert, um die steigende Wärmebelastung für den Bestand bei trockenem Boden zu berücksichtigen. Um festzustellen, ob Boden oder Atmosphäre die Transpiration der Pflanzen limitieren, wird die tägliche Wasseraufnahme durch die Pflanzenwurzeln berechnet, indem der maximale Wasserfluss zu den Wurzeln in jeder Bodenschicht kalkuliert wird. Dabei werden die Wurzellängendichte und der Wassergehalt in der jeweiligen Bodenschicht berücksichtigt. Die aktuelle Transpiration wird dann aus dem Minimum der potenziellen Transpiration und der potenziellen Wasseraufnahme durch Pflanzenwurzeln berechnet. Sie

kann also sowohl durch die Atmosphäre (niedrige Sonneneinstrahlung oder kühle Temperaturen), den Bestand (niedriger LAI) und den Boden (niedriger Bodenwassergehalt und niedrige WLD) limitiert werden.

### 5.2.3 Kalibrierung des Modells

Durch die Kalibrierung eines Modells werden die Differenzen zwischen gemessenen und den korrespondierenden simulierten Daten minimiert, indem die Parameter des Modells an diese spezifischen Bedingungen angepasst werden. Im CERES-Modell erfolgt die Kalibrierung in erster Linie über die Anpassung der sogenannten genetischen Koeffizienten. Diese können entweder manuell nach dem „visual eye fit“-Ansatz (HUNT, BOOTE 1998) oder mit einer entsprechenden Software (HUNT U. A. 1993) automatisch angepasst werden, indem die Koeffizienten über die Anpassung der kleinsten Quadrate schrittweise solange verändert werden, bis eine möglichst große Übereinstimmung zwischen gemessenen und simulierten Werten besteht. Im Fall der automatischen Anpassung wird mit der Methode der kleinsten Quadrate eine möglichst genau passende Modellkurve durch eine gegebene Punktwolke gelegt, die aus den simulierten (y) und den dazugehörigen beobachteten Werten (x) resultiert. Die Parameter der Kurve werden bestimmt, indem die Summe der quadratischen Abweichungen der Kurve von den simulierten Werten minimiert wird.

Zur Anpassung der genetischen Koeffizienten wird in DSSAT die gesamte Modellstruktur verwendet. Diese selbst wird während des Kalibrierungsprozesses nicht verändert, das heißt, alle weiteren im Modell enthaltenen Parameter, wie z. B. Stress- oder Partitionierungsfaktoren, bleiben gleich und nur die sieben genetischen Parameter werden verändert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde für die Kalibrierung die Software GENCALC (HUNT U. A. 1993) verwendet, die in DSSAT 4.5 enthalten ist. Für die Kalibrierung der drei Winterweizensorten Cubus, Ritmo und Tommi wurden die Daten von jeweils einem Monitoringpunkt der beiden Versuchsschläge verwendet, der bezüglich Wasser und Nährstoffen als optimal versorgt angesehen werden konnte (Finkenherd: Monitoringpunkt 1; Rabenberg: Monitoringpunkt 3). Die Daten dieser Untersuchungspunkte wurden bei der Validation der Simulationsergebnisse ausgeschlossen.

Der relative Wurzelpräferenzfaktor für die unterschiedlichen Bodenschichten wurde auf Mittelwerte geändert, die aus unabhängigen Felddaten kalkuliert wurden (Abb. 5.3).

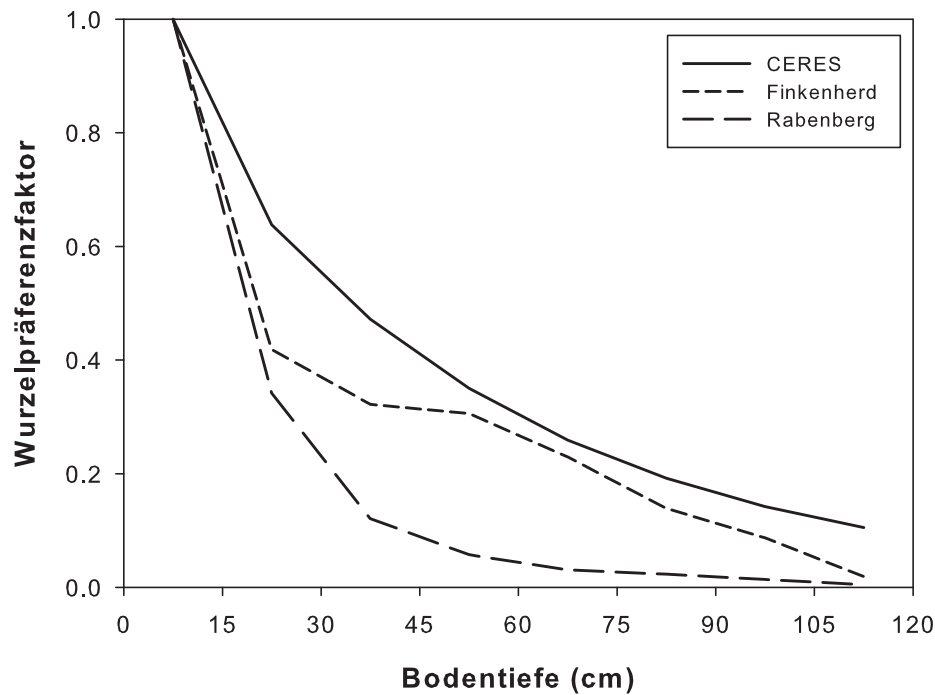


Abb. 5.3: Wurzelpräferenzfaktor nach CERES-Wheat sowie für die Versuchsschläge Finkenherd und Rabenberg

## 5.2.4 Validierung des Modells

Um die Vorhersagequalität von CERES-Wheat zu überprüfen, wurden die auf den Versuchsschlägen erhobenen Daten zu Wurzellängendichte und Bodenwassergehalt genutzt (ausgenommen der zur Kalibrierung verwendeten Daten). Neben deskriptiven Statistiken, wie z. B. Mittel- und Extremwerte, wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Um die Voraussetzungen für die Regressionsanalysen zu gewährleisten, wurden die Daten gegebenenfalls logarithmisch transformiert. Des Weiteren wurde als Maß für die Streuung die Varianz ( $Var$ ) der gemessenen und simulierten Werte und als Maß für die Abweichung der simulierten Werte vom erwarteten beobachteten Mittelwert der Bias der simulierten Werte berechnet:

$$Var = \left( \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \right)^2 \quad \text{und} \quad Bias = (\bar{x}_{sim} - \bar{x}_{gem})^2$$

wobei  $x_i$  die beobachteten bzw. simulierten Werte,  $\bar{x}$  der Mittelwert der beobachteten bzw. simulierten Werte und  $n$  die Stichprobenanzahl sowie  $\bar{x}_{sim}$  und  $\bar{x}_{gem}$  die Mittelwerte der simulierten bzw. der gemessenen Werte sind.

Als Gesamtmaß für die Abweichung der simulierten von den tatsächlichen Werten wurde außerdem der ‚root mean square error‘ (*RMSE*) berechnet:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{sim} - x_{gem})^2}{n}}$$

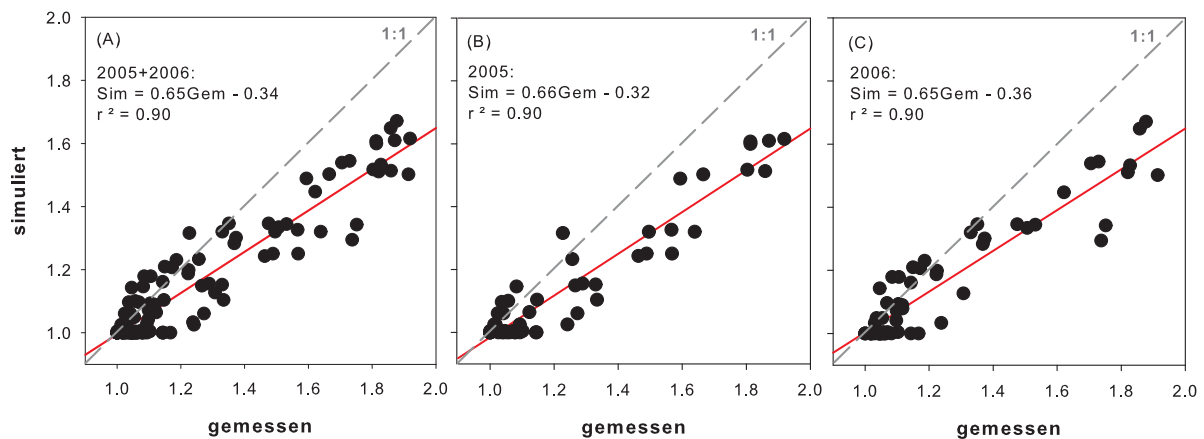
wobei  $n$  die Stichprobengröße und  $x_{sim}$  und  $x_{gem}$  simulierte und gemessene Werte sind.

Der *RMSE* stellt eine gängige Größe zur Bewertung der Simulationsgenauigkeit von Modellen dar (vgl. DIEKKRÜGER U. A. 1995; WEGEHENKEL 2000).

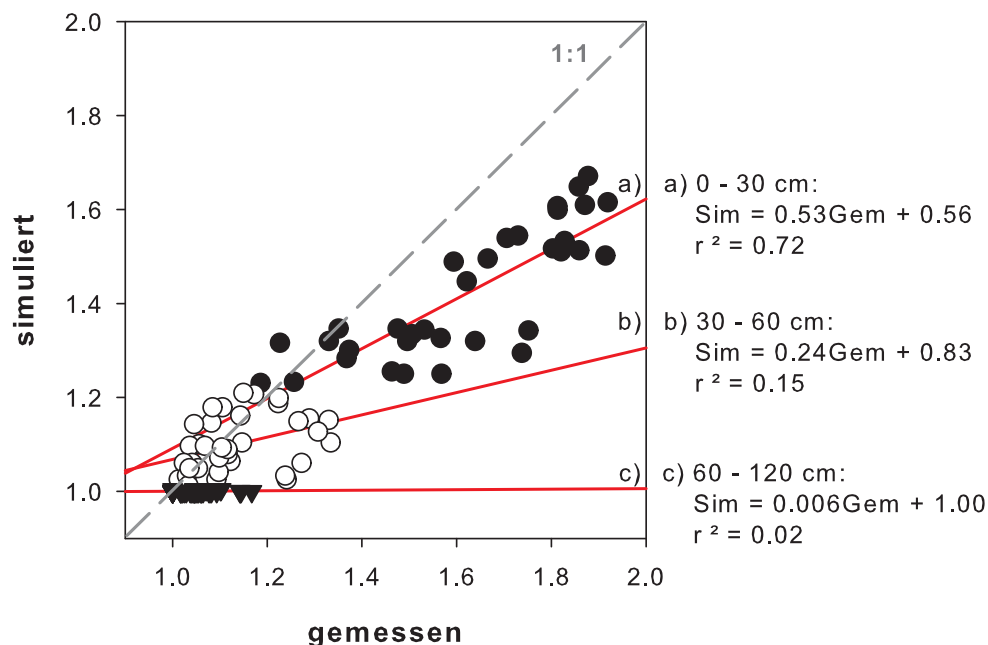
Klima, Geogenese und Relief sowie Pedogenese und Bodenverbreitung an den Versuchsstandorten sind in Kapitel 2 dieser Arbeit beschrieben worden, weshalb an dieser Stelle nicht mehr auf die Standortbedingungen und Lage der Versuchsschläge eingegangen wird. Das Gleiche gilt sowohl für die Methodik der Wurzeluntersuchungen als auch für die Bestimmung des Bodenwassergehaltes. Diese sind ausführlich in den Kapiteln 3.2 bzw. 4.2 beschrieben.

### 5.3 Ergebnisse und Diskussion

Gemessene und simulierte Wurzellängendichten sind auf beiden Versuchsschlägen sehr gut korreliert (Abb. 5.4 und Abb. 5.6). Bezüglich des Schlages Rabenberg sind die Bestimmtheitsmaße ( $r^2$ ) sehr hoch und liegen bei 0.90 (Abb. 5.4). Bezüglich des Finkenherdes ist das Bestimmtheitsmaß mit Werten zwischen 0.65 und 0.72 niedriger, aber noch akzeptabel (Abb. 5.6). Insgesamt werden die Wurzellängendichten jedoch für den Schlag Rabenberg um 35 % und für den Schlag Finkenherd um ca. 25 bis 35 % unterschätzt. Ähnliche Ergebnisse erhielten ROBERTSON U. A. 1993 mit einem Modell zur Simulation des Wurzelwachstums von Sorghumhirse, das auf dem CERES-Ansatz basiert. Die Bestimmtheitsmaße für den Zusammenhang zwischen beobachteten und simulierten Wurzellängendichten lagen für verschiedene unabhängige Datensets zwischen 0.71 und 0.85, wobei die Wurzellängendichte in vielen Fällen um mehr als 20 % unterschätzt wurde. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen konnten SAVIN, HALL, SATORRE 1994 unter Verwendung des von CERES-Wheat kalkulierten Wurzelwachstumsfaktors eine nur sehr schwache Korrelation zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten für verschiedene Entwicklungsstadien bei Weizen feststellen ( $r^2 = 0.11$ ). Sie führten dies unter anderem auf eine erhebliche Unterschätzung der



**Abb. 5.4:** Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten (logarithmisch transformiert) für den Versuchsschlag Rabenberg



**Abb. 5.5:** Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten (logarithmisch transformiert) in unterschiedlichen Bodentiefen für den Versuchsschlag Rabenberg

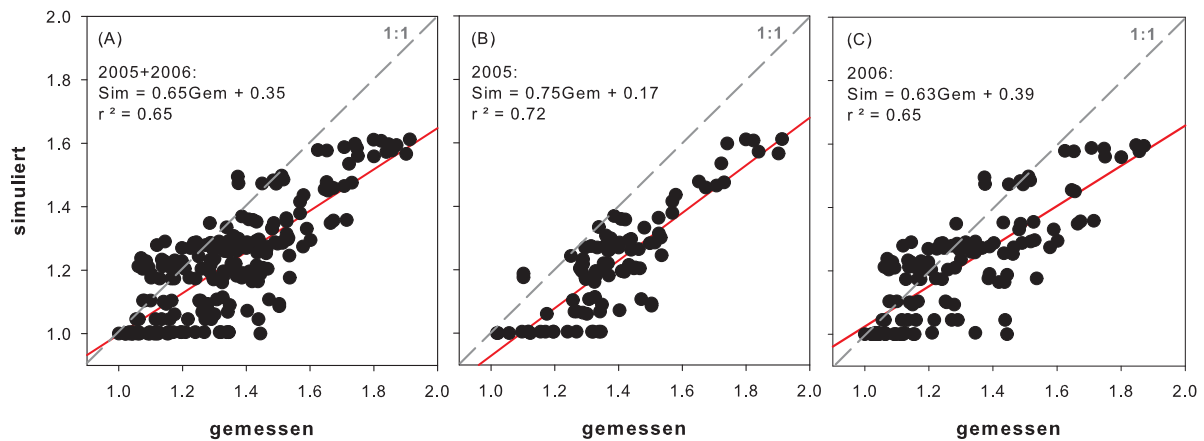
Wurzellängendichte in den oberen 10 cm des Bodens und deren Überschätzung in den unteren Bodenschichten zurück. Unter Vernachlässigung der Simulationsergebnisse für die oberen 5 cm des Bodens konnten sie die Berechnungen deutlich verbessern, so dass das Bestimmtheitsmaß 0.66 betrug. Von einer Tendenz zur Unterschätzung der oberflächennahen Wurzellängendichte und einer Überschätzung derselben in tieferen Bodenschichten berichten auch ROBERTSON U. A. 1993 einen Teil ihrer Simulationsergebnisse betreffend. Ähnliche Ergebnisse wurden unter Verwendung des von CERES-Wheat kalkulierten Wurzelwachstumsfaktors für die Versuchsschläge Rabenberg und Finkenherd ermittelt.



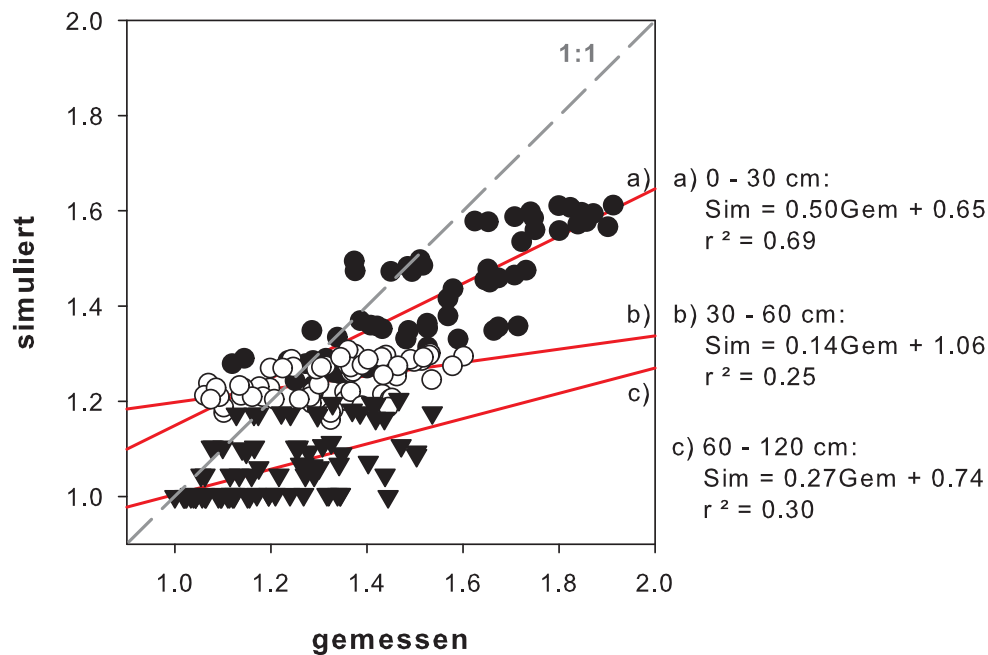
**Tab. 5.1: Deskriptive Statistik für die Wurzellängendichte (bis 1.2 m Profiltiefe) auf dem Versuchsschlag Rabenberg und Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und simulierten Werten in den beiden Versuchsjahren 2005 und 2006 sowie für beide Jahre zusammen**

Statistischer Parameter	2005		2006		2005 + 2006	
	gem	sim	gem	sim	gem	sim
Mittel ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	1.3	0.6	1.4	0.7	1.4	0.6
Median ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	0.2	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2
Variationskoeff. ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	154.7	159.0	169.7	148.7	163.9	152.7
Varianz ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	3.8	0.9	6.0	1.0	5.0	0.9
Minimum ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Maximum ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	7.3	3.1	10.8	3.8	10.8	3.8
FG	54	54	65	65	120	120
RMSE	-	1.1	-	1.3	-	1.2

Unter Verwendung des Modellfaktors wurde die Wurzellängendichte im Oberboden ebenfalls erheblich unterschätzt und im Unterboden insbesondere für den Schlag Rabenberg deutlich überschätzt (Daten hier nicht gezeigt). Des Weiteren lagen die Bestimmtheitsmaße vor der Anpassung des Wurzelwachstumsfaktors für beide Versuchsschläge deutlich niedriger (Rabenberg: 0.72 - 0.75; Finkenherd: 0.55 - 0.64). Nach Anpassung des Wurzelwachstumsfaktors konnte bei Betrachtung der Zusammenhänge in unterschiedlichen Bodentiefen im Gegensatz zu den Ergebnissen der Studie von SAVIN, HALL, SATORRE 1994 festgestellt werden, dass sich die engen Korrelationen für die Versuchsschläge Rabenberg und Finkenherd auf den Oberboden beschränken und für die unteren Bodenschichten nur geringe Zusammenhänge bestehen (Abb. 5.5 und Abb. 5.7). Den Schlag Rabenberg betreffend, liegt das Bestimmtheitsmaß für die oberen 30 cm bei 0.72, die Wurzellängendichten werden jedoch deutlich um ca. 45 % unterschätzt (Abb. 5.5 a). In den unteren Bodenschichten, das heißt in Bereichen von 30 - 60 und 60 - 120 cm Tiefe, besteht nur noch ein sehr geringer bzw. so gut wie kein Zusammenhang zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten, die auch in diesen Tiefen unterschätzt werden (Abb. 5.5 b und c). Für den Schlag Finkenherd ist der Zusammenhang in den oberen 30 cm des Bodens mit einem  $r^2$  von 0.69 etwas niedriger als für den Schlag Rabenberg und auch in diesem Fall werden die Wurzellängendichten um ca. 50 % unterschätzt (Abb. 5.7 a). In den Tiefen von 30 - 60 und 60 - 120 cm sind die Zusammenhänge zwar besser als im Vergleich zum Schlag Rabenberg, die Bestimmtheitsmaße von 0.25 und 0.30 zeigen jedoch nur eine schwache Korrelation zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten an (Abb. 5.7 b und c). Beim Vergleich der kumulativen Wurzellängendichten bis 1.2 m Bodentiefe sowie verschiedener deskriptiver statistischer Parameter wird deutlich, dass CERES-Wheat den Einfluss der Standortunterschiede auf das Wurzelwachstum zwischen den Untersuchungspunkten der



**Abb. 5.6:** Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten (logarithmisch transformiert) für den Versuchsschlag Finkenherd



**Abb. 5.7:** Beziehung zwischen gemessenen und simulierten Wurzellängendichten (logarithmisch transformiert) in unterschiedlichen Bodentiefen für den Versuchsschlag Finkenherd

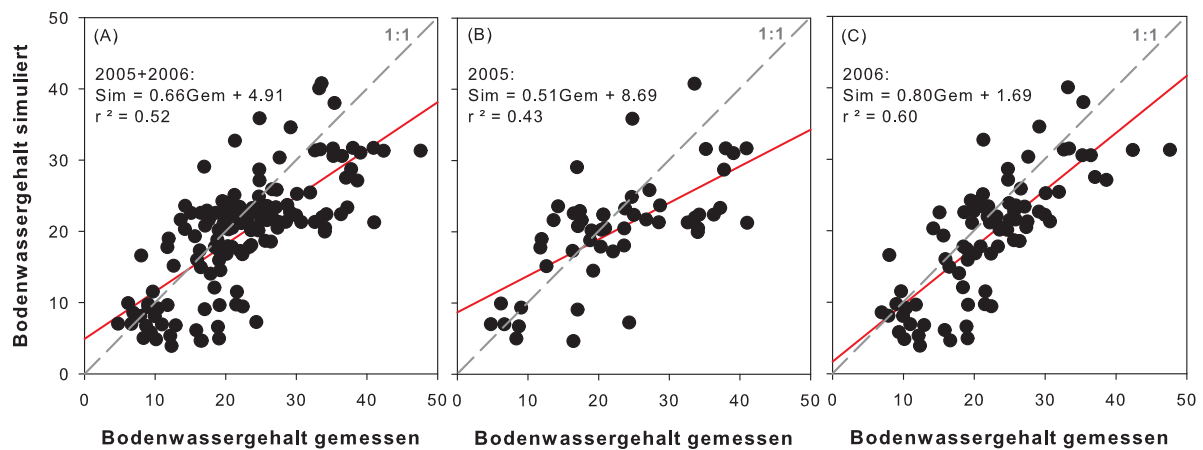
Versuchsschläge nur marginal abbildet (Tab. 5.1 und Tab. 5.2 sowie Abb. 5.10 und Abb. 5.11). Im Gegensatz zu den im Feld erhobenen Daten, die sich bezüglich der kumulativen Wurzellängendichten und der deskriptiven Statistikparameter deutlich unterscheiden, ändern sich die kumulativen Wurzellängendichten, Mittelwerte, Mediane, Variationskoeffizienten, Varianzen und Maximalwerte der simulierten Daten für die beiden Schläge in den Versuchsjahren kaum und sind fast immer deutlich geringer als die der gemessenen Werte.

**Tab. 5.2: Deskriptive Statistik für die Wurzellängendichte (bis 1.2 m Profiltiefe) auf dem Versuchsschlag Finkenherd und Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und simulierten Werten in den beiden Versuchsjahren 2005 und 2006 sowie für beide Jahre zusammen**

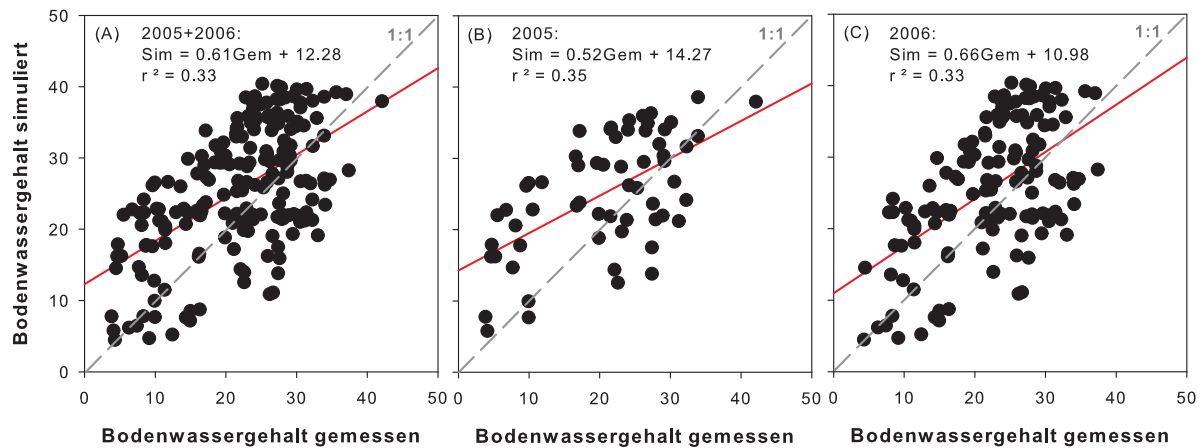
Statistischer Parameter	2005		2006		2005 + 2006	
	gem.	sim.	gem.	sim.	gem.	sim.
Mittel ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	1.7	0.8	1.3	0.8	1.5	0.8
Median ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	1.3	0.6	0.8	0.6	1.1	0.6
Variationskoeff. ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	83.5	97.7	105.9	99.1	95.5	98.3
Varianz ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	2.0	0.6	1.9	0.6	2.0	0.6
Minimum ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Maximum ( $\text{cm cm}^{-3}$ )	7.2	3.1	6.4	3.0	7.2	3.1
FG	93	93	123	123	217	217
RMSE	-	1.2	-	0.9	-	1.0

Dies ist neben den Ergebnissen der Regressionsanalysen ein weiterer Beweis für die Unterschätzung der Wurzellängendichte durch das Modell. Die Werte für den RMSE der Simulationen bewegen sich zwischen 0.9 und 1.3 cm Wurzeln je  $\text{cm}^3$  Boden.

In dem Modell CERES-Wheat ist Bodenwasser einer der Hauptfaktoren, die das Wurzelwachstum unter gegebenen oberirdischen Wachstumsbedingungen beeinflussen. Das simulierte Wurzelwachstum wird direkt und indirekt (z. B. durch die Simulation von Stickstoff) durch Stresskoeffizienten beeinflusst (siehe auch Kap. 5.2.2, Entwicklung des Wurzelsystems), die empirisch definiert sind und auf Informationen über das Bodenwasser basieren (RITCHIE, GODWIN, OTTER-NACKE 1988). Aufgrund dieses Zusammenhangs wurde die Validität der Bodenwassersimulation mit gemessenen Daten überprüft. Gemessene und simulierte Bodenwassergehalte korrelieren für den Versuchsschlag Rabenberg mit Bestimmtheitsmaßen zwischen 0.43 und 0.60 nur relativ gut, für den Schlag Finkenherd mit einem  $r^2$  von 0.33 bis 0.35 nur schwach (Abb. 5.8 und Abb. 5.9). In der schon erwähnten Studie von SAVIN ET AL. (1993) konnte dagegen eine gute Übereinstimmung von gemessenen und simulierten Bodenwassergehalten festgestellt werden ( $r^2 = 0.86$ ). Die Autoren merken jedoch an, dass unter den Bedingungen ihres Experimentes kein starker Wasserstress auftrat und dass eine Übertragung der Ergebnisse auf Bedingungen unter größerem Wasserstress - wie sie beispielsweise auf dem Versuchsschlag Finkenherd durchaus vorkommen - nur unter Vorsicht gemacht werden sollten. Den Versuchsschlag Rabenberg betreffend, tendiert CERES dazu, Bodenwassergehalte unterhalb von 15 Vol% zu überschätzen und oberhalb von 15 Vol% zu unterschätzen (Abb. 5.8). Für den Schlag Finkenherd zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei der Grenzwert zwischen Unter- und Überschätzung bei 30 Vol% liegt (Abb. 5.9). Interessanterweise umfassen diese Bereiche jeweils Wassergehalte, die für die auf den Schlägen in den oberen 50 cm vorwiegend auftretenden Texturen im Bereich der



**Abb. 5.8:** Beziehung zwischen gemessenem und simuliertem Bodenwassergehalt (Vol%) für den Versuchsschlag Rabenberg



**Abb. 5.9:** Beziehung zwischen gemessenem und simuliertem Bodenwassergehalt (Vol%) für den Versuchsschlag Finkenherd

Feldkapazität liegen. Eine Erklärung hierfür liefert das dem abwärtsgerichteten Wasserfluss zugrunde liegende Prinzip im Bodenwassermodul von DSSAT: für die Berechnung der Abwärtsbewegung von Bodenwasser nutzt das Modell den sogenannten wasser-gehaltsgetriebenen „tipping bucket“-Ansatz. Das heißt, abwärts gerichteter Wasserfluss aus einer Bodenschicht findet dann statt, wenn der Bodenwassergehalt in der Schicht zwischen Sättigung und Feldkapazität liegt. Liegt der Wassergehalt unterhalb der Feldkapazität, findet kein Wasserfluss statt. Das Modell simuliert also bei Wassergehalten unterhalb der Feldkapazität eine geringere Dynamik, die zu einer deutlichen Minderung bzw. Stagnierung der Wassergehaltsänderung und so vermutlich zu einer Überschätzung der Gehalte führt. DE FARIA, BOWEN 2003 haben in einer Studie zur Evaluierung des Bodenwassermoduls von DSSAT herausgefunden, dass das Modell unter unbepflanzten Bedingungen den

**Tab. 5.3: Deskriptive Statistik für den Bodenwassergehalt (bis 1.2 m Profiltiefe) auf dem Versuchsschlag Rabenberg und Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und simulierten Werten in den beiden Versuchsjahren 2005 und 2006 sowie für beide Jahre zusammen**

Statistischer Parameter	2005		2006		2005 + 2006	
	gem.	sim.	gem.	sim.	gem.	sim.
Mittel (Vol%)	22.8	20.4	22.1	19.4	22.4	19.8
Median (Vol%)	20.8	21.3	21.5	21.1	21.3	21.2
Variationskoeff. (Vol%)	43.0	37.5	37.4	44.0	39.7	41.3
Varianz (Vol%)	96.2	58.4	68.4	72.6	78.8	66.8
Minimum (Vol%)	4.8	4.7	6.9	3.9	4.8	3.9
Maximum (Vol%)	41.0	40.8	47.6	40.1	47.6	40.8
FG	53	53	82	82	136	136
RMSE	-	8.0	-	9.0	-	8.6

**Tab. 5.4: Deskriptive Statistik für den Bodenwassergehalt (bis 1.2 m Profiltiefe) auf dem Versuchsschlag Finkenherd und Ergebnisse des Vergleichs von gemessenen und simulierten Werten in den beiden Versuchsjahren 2005 und 2006 sowie für beide Jahre zusammen**

Statistischer Parameter	2005		2006		2005 + 2006	
	gem.	sim.	gem.	sim.	gem.	sim.
Mittel (Vol%)	20.6	25.1	22.1	25.5	21.6	25.4
Median (Vol%)	22.4	26.0	23.3	25.4	23.1	25.8
Variationskoeff. (Vol%)	45.0	32.7	35.7	35.6	38.5	34.7
Varianz (Vol%)	86.4	67.4	62.2	82.5	69.6	77.6
Minimum (Vol%)	3.8	5.8	4.3	4.5	3.8	4.5
Maximum (Vol%)	42.1	38.6	37.4	40.4	42.1	40.4
FG	59	59	136	136	196	196
RMSE	-	9.4	-	9.7	-	9.6

Wasserabfluss in unteren Bodenschichten (unterhalb 40 cm Tiefe) unterschätzte, wenn der Bodenwassergehalt unterhalb der Feldkapazität lag. Als Konsequenz daraus war der simulierte Bodenwassergehalt nahe Gehalten bei Feldkapazität konstant, im Gegensatz zu den beobachteten Wassergehalten, die während Trockenperioden aufgrund von ungesättigtem Abwärtsfluss abnahmen. Eine Erklärung für die tendenzielle Unterschätzung der Bodenwassergehalte oberhalb der Feldkapazität kann die in unterschiedlichen Studien z. B. schon von JAMIESON U. A. 1998, EITZINGER U. A. 2004 oder SAU U. A. 2004 festgestellte Überschätzung der Wasserentleerung des Bodens sein. Beim Vergleich der deskriptiven Statistiken für den Bodenwassergehalt wird die Überschätzung der Gehalte auf dem Schlag Finkenherd sowie die Unterschätzung der Gehalte auf dem Versuchsschlag Rabenberg unterstützt. Bezüglich des Schlages Finkenherd sind Mittelwerte und Mediane der gemessenen Bodenwassergehalte niedriger als die aus den simulierten Werten kalkulierten Parameter (Tab. 5.3). Für den Versuchsschlag Rabenberg sind diese Parameter der gemessenen Werte meist höher als die der simulierten (Tab. 5.4), was die tendenzielle

Unterschätzung der Bodenwassergehalte für diesen Schlag durch das Modell bekräftigt. Von einer Unterschätzung der Bodenwassergehalte durch CERES-Wheat in den oberen 90 cm des Bodens berichten auch EITZINGER U. A. 2004 in ihrer Studie über den Vergleich verschiedener Pflanzenwachstumsmodelle.

Auch bezüglich der räumlichen Variabilität treten Unterschiede zwischen gemessenen und simulierten Wassergehalten auf: Abb. 5.10 und Abb. 5.11 zeigen die gemessenen und simulierten kumulativen Wassergehalte und Wurzellängendichten bis 1.2 m Bodentiefe. Aus den Abbildungen ist ersichtlich, dass die Bodenwassergehalte im Gegensatz zu den Wurzellängendichten von CERES-Wheat mit einer höheren räumlichen Variabilität simuliert werden, dass die tatsächliche Variabilität - insbesondere für den Schlag Finkenherd - jedoch nicht widerspiegelt wird. Dies wird z. B. beim Vergleich der gemessenen und simulierten Bodenwassergehalte der Monitoringpunkte 7 bis 10 auf dem Versuchsschlag Finkenherd deutlich (Abb. 5.11). Die Abbildungen bestätigen ebenfalls die tendenzielle Unterschätzung der Gehalte auf dem Versuchsschlag Rabenberg. Die simulierten kumulativen Bodenwassergehalte sind für den Versuchsschlag Rabenberg bis auf wenige Ausnahmen niedriger, für den Schlag Finkenherd meist höher als die gemessenen Werte. Die Werte für den RMSE der Wassergehaltssimulationen bewegen sich für den Rabenberg zwischen 8.0 und 9.0 Vol%, für den Schlag Finkenherd zwischen 9.4 und 9.7 Vol% (Tab. 5.3 und Tab. 5.4). In anderen Studien mit CERES-Wheat wurden je nach Bodentiefe RMSE-Werte zwischen 9.8 und 16.6 Vol% (XEVI, GILLEY, FEYEN 1996) bzw. auf lehmigen Böden zwischen 3.0 und 5.4 Vol% (GARRISON U. A. 1999) ermittelt. EITZINGER U. A. 2004 berichten je nach Bodentyp von RMSE-Werten zwischen 3.8 und 7.0 Vol% bzw. je nach Bodentiefe von Werten zwischen 0.6 und 8.6 Vol%. Zur Überprüfung der Vorhersagequalität bezüglich der räumlichen Variabilität wurden zusätzlich die zeitlichen Änderungen simulierter und gemessener Bodenwassergehalte verglichen. Hierzu wurde der auf den beiden Versuchsschlägen mit TDR-Sonden zeitlich hoch aufgelöst gemessene volumetrische Bodenwassergehalt genutzt. Die Messpunkte unterscheiden sich hinsichtlich ihrer bodenphysikalischen Eigenschaften deutlich. Der grundwasserferne Intensivmesspunkt 1 auf dem Schlag Rabenberg ist durch glaziale Lehmsande über Sanden und einer pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge im oberen Meter von ca. 130 mm charakterisiert. Die Pflanzen sind an diesem Standort im Verlauf der Vegetationsperiode Wasserstress ausgesetzt. Dies wird durch die von Partnern des preagro II-Projektes an den Monitoringpunkten des Versuchsschlages durchgeführten Stressbonituren bestätigt (Daten nicht gezeigt). Intensivmesspunkt 2 auf dem Rabenberg ist durch glaziale Lehmsande über Schluffton, einem Grundwasserstand von ca. 1.2 m und einer

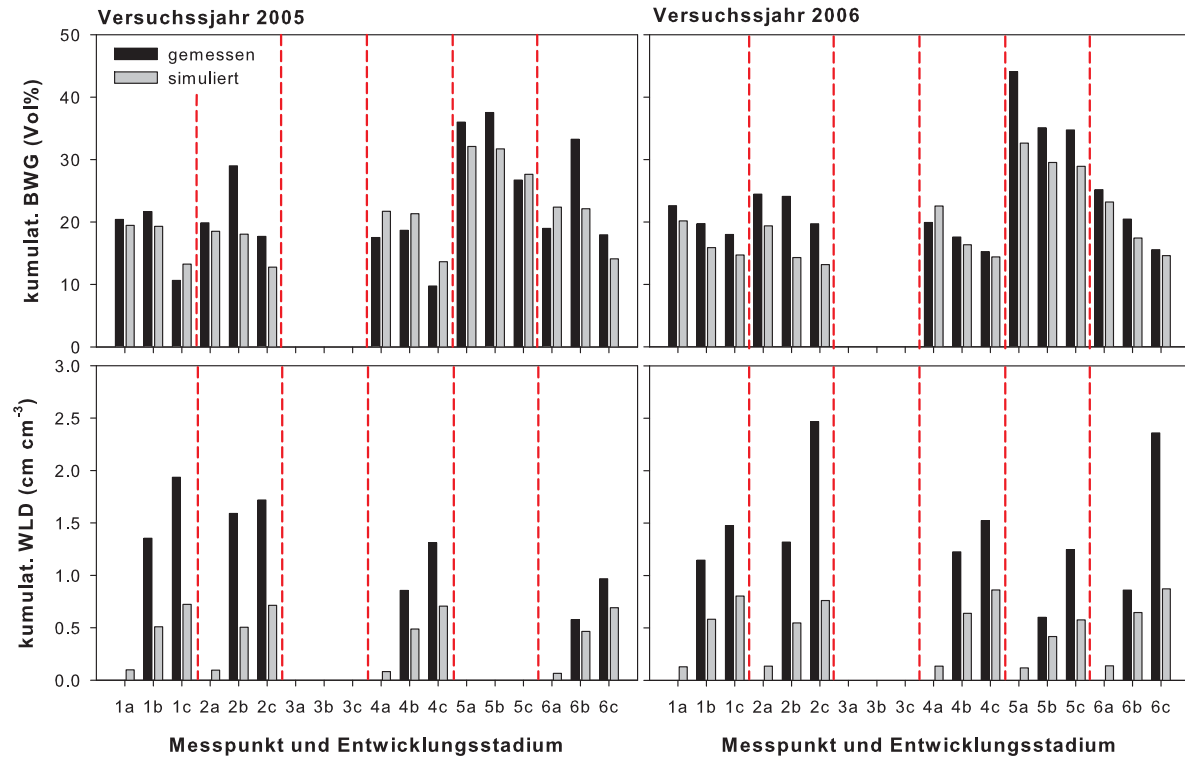


Abb. 5.10: Kumulative gemessene und simulierte Bodenwassergehalte (BWG) und Wurzellängendichten (WLD) zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (a: Beginn Vegetationsperiode, b: Schossen, c: Blüte) an den unterschiedlichen Messpunkten auf dem Versuchsschlag Rabenberg in den Jahren 2005 und 2006

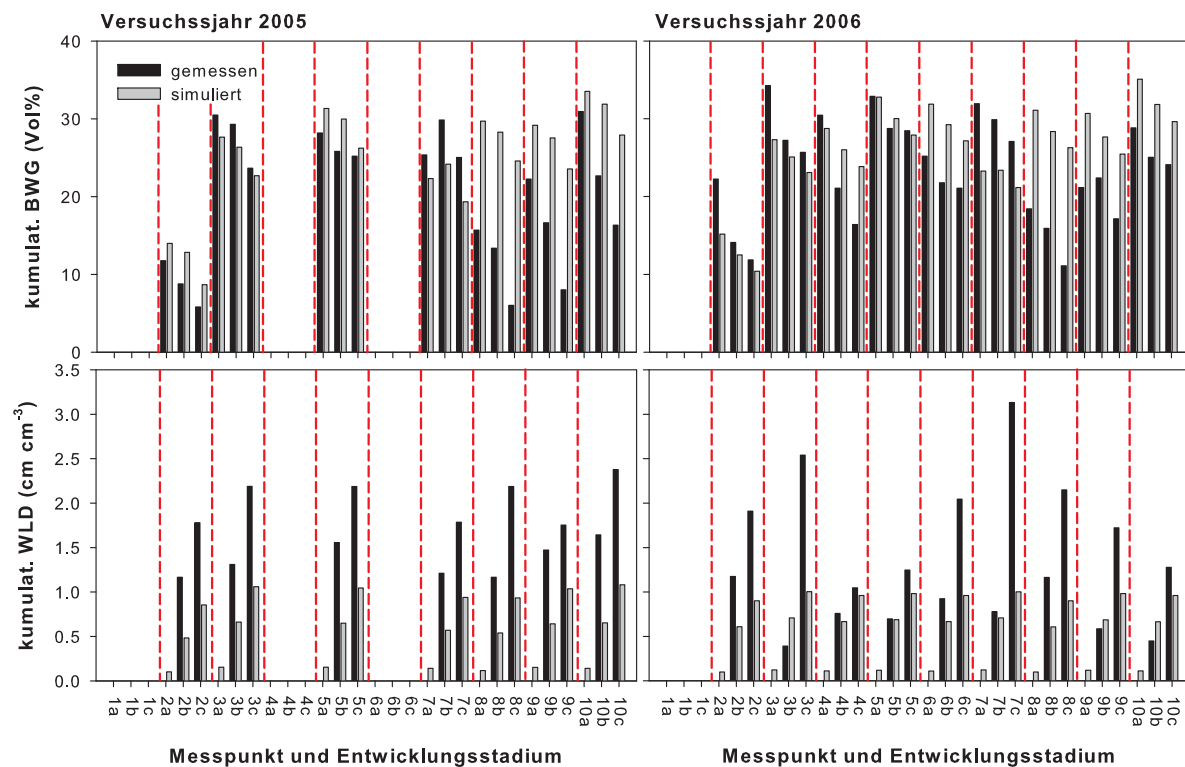
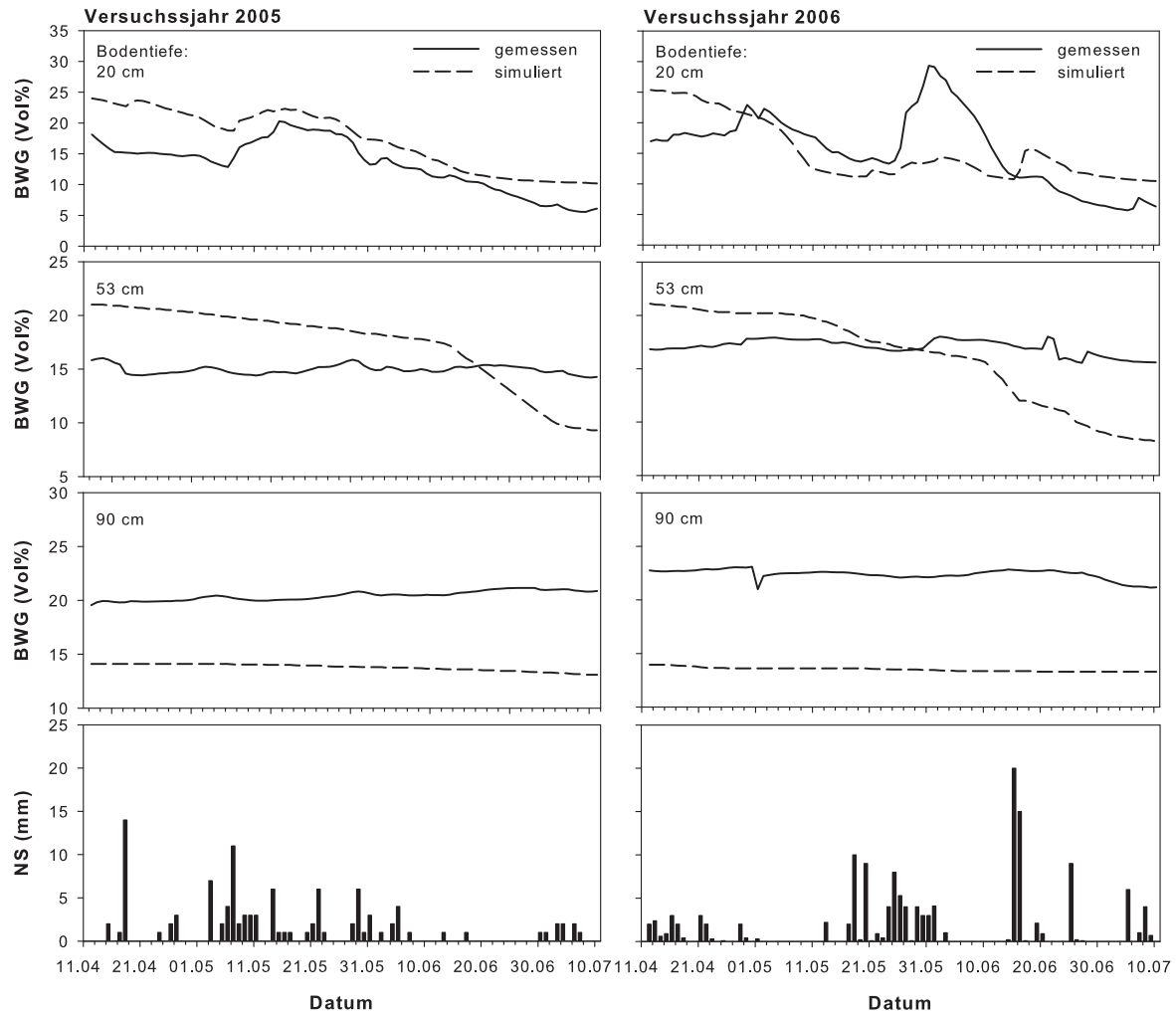


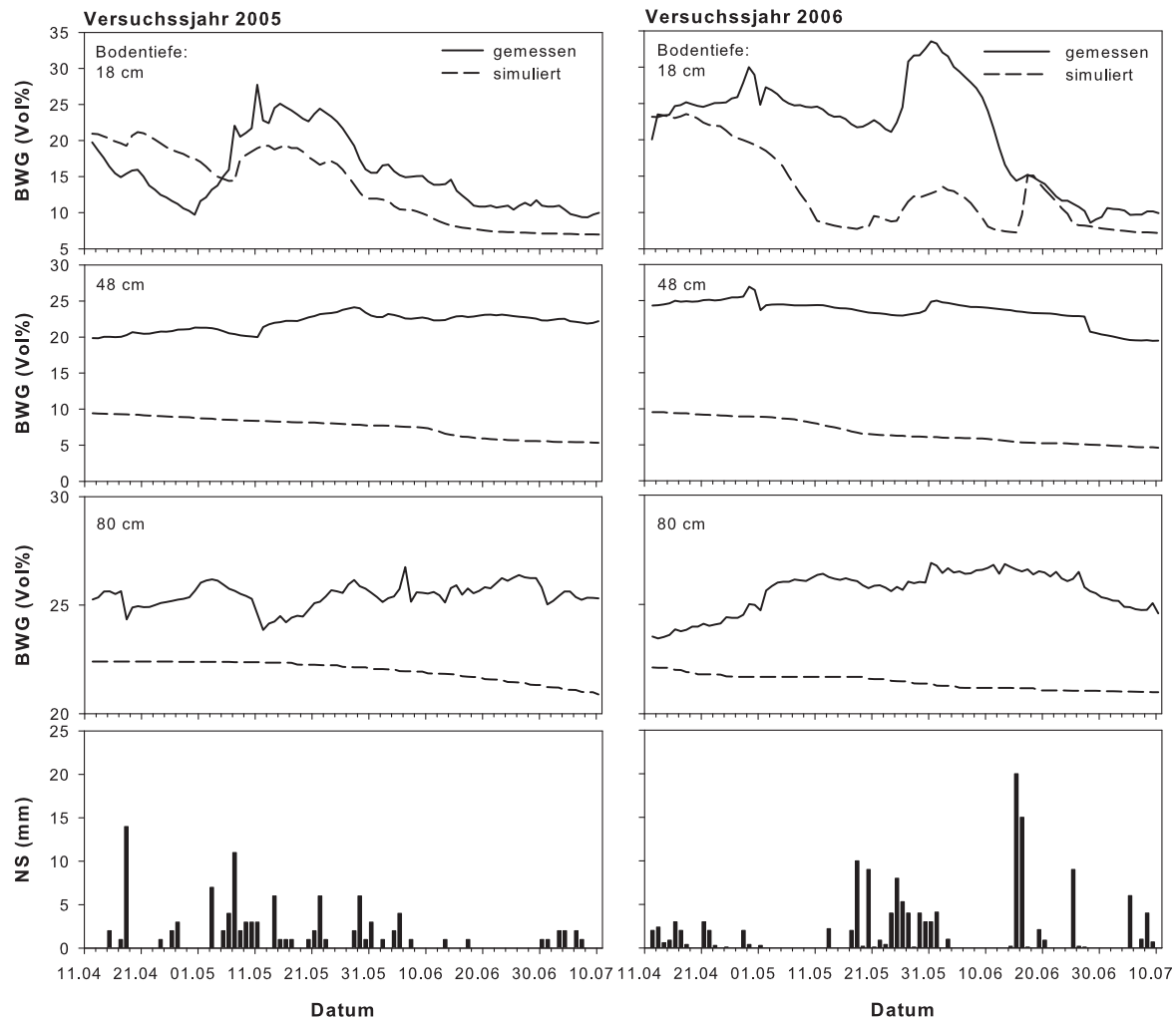
Abb. 5.11: Kumulative gemessene und simulierte Bodenwassergehalte (BWG) und Wurzellängendichten (WLD) zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien (a: Beginn Vegetationsperiode, b: Schossen, c: Blüte) an den unterschiedlichen Messpunkten auf dem Versuchsschlag Finkenherd in den Jahren 2005 und 2006



**Abb. 5.12: Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen und Niederschlag in den Versuchsjahren 2005 und 2006 am Intensivmesspunkt 1 des Versuchsschlages Rabenberg**

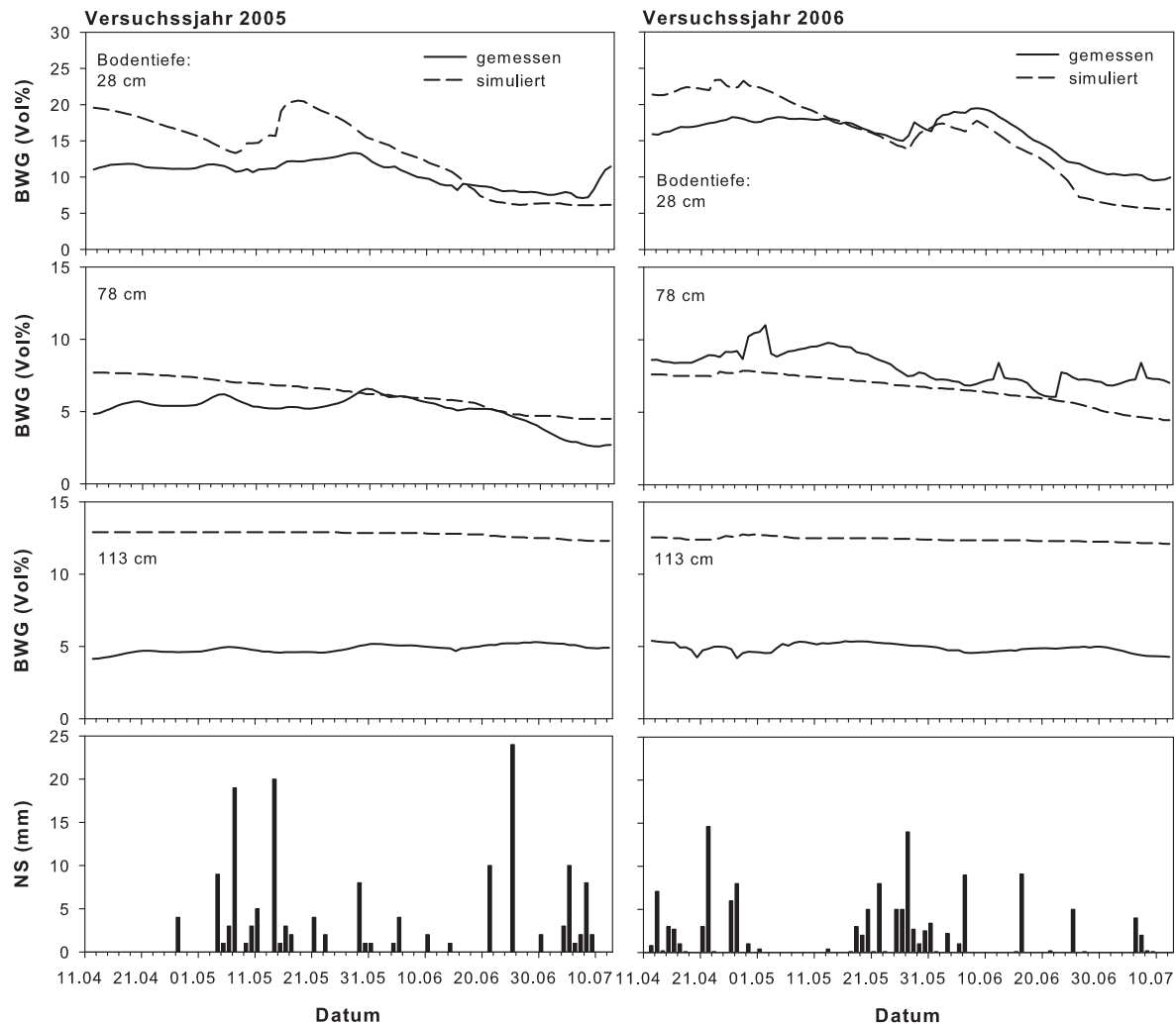
pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge im oberen Meter von ca. 190 mm charakterisiert. Die Pflanzen sind unter diesen Bedingungen im Vergleich zum Intensivmesspunkt 1 zwar besser mit Wasser versorgt, aber dennoch im späteren Verlauf der Vegetationsperiode Wasserstress ausgesetzt (entspricht Ergebnissen der Stressbonituren). Die Daten von Intensivmesspunkt 1 auf dem Schlag Finkenherd wurden nicht zum Vergleich herangezogen, da dieser Messpunkt zur Kalibrierung des Modells diente. Intensivmesspunkt 2 ist durch Sandlöss über Sand und Kies und eine pflanzenverfügbare Bodenwassermenge im oberen Meter von ca. 60 mm charakterisiert. Die Pflanzen sind unter diesen Bedingungen aufgrund der niedrigen Wasserhaltekapazität des Bodens im Verlauf der Vegetationsperiode starkem Wasserstress ausgesetzt (entspricht Ergebnissen der Stressbonituren). Die zeitlichen Änderungen des Wassergehaltes in unterschiedlichen Bodentiefen an den Messpunkten sowie die entsprechenden Simulationsergebnisse sind in Abb. 5.12 bis Abb. 5.14 dargestellt.





**Abb. 5.13: Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen und Niederschlag in den Versuchsjahren 2005 und 2006 am Intensivmesspunkt 2 des Versuchsschlagles Rabenberg**

Die Abbildungen zeigen, dass das Modell das Ausmaß der Wassergehaltsänderungen über die Zeit vor allem in den oberen 50 cm des Bodens häufig überschätzt. Der Vergleich deskriptiver Statistiken simulierter und gemessener Werte ergibt, dass die simulierten Bodenwassergehalte in dieser Bodentiefe meist eine höhere Variabilität besitzen, als die gemessenen (Tab. 5.5). Dieses Ergebnis ist vergleichbar mit den Ergebnissen der Studie von EITZINGER U. A. 2004, die feststellten, dass die Variabilität der von CERES-Wheat simulierten Bodenwassergehalte höher war als die der im Feld gemessenen Daten. Des Weiteren berichten SADLER U. A. 2000, dass CERES die auf dem sogenannten „curve number“-Konzept basierende Bodeninfiltration überschätzt. Dies könnte eine Erklärung für die Diskrepanzen zwischen den gemessenen und simulierten Zeittrends der Änderungen im Bodenwassergehalt sein. Aus den Abbildungen ist weiterhin ersichtlich, dass - wie zu erwarten - ein enger Zusammenhang zwischen auftretenden Niederschlagsmengen und der Änderung von gemessenen und simulierten Bodenwassergehalten besteht.



**Abb. 5.14: Bodenwassergehalt in unterschiedlichen Bodentiefen und Niederschlag in den Versuchsjahren 2005 und 2006 am Intensivmesspunkt 2 des Versuchsschlages Finkenherd**

Basierend auf einer Validationsstudie, die in über neun aufeinander folgenden Vegetationsperioden unter norddeutschen Klimabedingungen bei Kiel durchgeführt wurde, konnten LANGENSIEPEN U. A. 2008 zeigen, dass die Niederschlagsvariabilität großen Einfluss auf die Vorhersagequalität von CERES-Wheat bezüglich des Ertrages hat. Zu demselben Ergebnis kamen auch SARKAR, KAR 2008, die bei einer Sequenzanalyse mit DSSAT ebenfalls einen deutlichen Zusammenhang zwischen Niederschlagsdaten und simuliertem Ertrag ermittelten. HEINEMANN, HOOGENBOOM, CHOJNICKI 2002 konnten bei ihren Untersuchungen zum Einfluss potenzieller Fehler von Niederschlagsdaten auf die Simulationsergebnisse von DSSAT sowohl einen starken Einfluss auf den simulierten Ertrag als auch auf die simulierte Biomasse und weitere Outputvariablen von DSSAT belegen.

Die verwendeten Klimadaten für die beiden Untersuchungsgebiete stammen aus der MARS-Datenbasis des Joint Research Centre der Europäischen Kommission (JRC), die regionalisierte Wetterdaten liefert. Da diese Daten auf interpolierten Werten verschiedener

**Tab. 5.5: Varianz (Var), Variationskoeffizient (VK) und Standardabweichung (StAb) der zeitlich hoch aufgelöst gemessenen und simulierten Bodenwassergehalte an ausgewählten Messpunkten der Versuchsschläge Rabenberg und Finkenherd**

<u>Rabenberg</u>												
<u>2005</u>												
	20 cm		Punkt 1 53 cm		90 cm		18 cm		Punkt 2 48 cm		80 cm	
	gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim
Var	17.1	23.8	0.2	13.2	0.2	0.1	23.9	26.8	1.3	1.8	0.3	0.2
VK	31.1	28.1	2.8	20.9	2.1	2.3	31.5	38.1	5.2	17.8	2.2	2.1
StAb	4.1	4.9	0.4	3.6	0.4	0.3	4.9	5.2	1.1	1.3	0.6	0.5
<u>2006</u>												
Var	36.5	24.2	0.5	18.7	0.2	0.0	51.2	30.8	2.9	2.8	0.9	0.1
VK	38.6	32.3	4.1	26.9	2.1	1.4	33.6	43.2	7.3	24.6	3.8	1.5
StAb	6.0	4.9	0.7	4.3	0.5	0.2	7.2	5.5	1.7	1.7	1.0	0.3
<u>Finkenherd</u>												
<u>2005</u>												
	20 cm		Punkt 1 53 cm		70 cm		28 cm		Punkt 2 78 cm		113 cm	
	gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim	gem	sim
Var	-	-	-	-	-	-	3.0	24.4	1.0	1.0	0.1	0.0
VK	-	-	-	-	-	-	16.5	37.0	19.4	15.9	5.5	0.5
StAb	-	-	-	-	-	-	1.7	4.9	1.0	1.0	0.3	0.1
<u>2006</u>												
Var	-	-	-	-	-	-	8.9	32.1	1.2	0.9	0.1	0.0
VK	-	-	-	-	-	-	18.9	36.2	13.7	13.8	6.3	1.0
StAb	-	-	-	-	-	-	3.0	5.7	1.1	0.9	0.3	0.2

Wetterstationen der entsprechenden Region basieren und da Klimadaten generell starken kleinräumigen Schwankungen unterliegen, stellen diese Eingangsdaten zwangsläufig eine Unsicherheit bezüglich der Simulationen dar. Aus diesem Grund wurde eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt, indem die Niederschlagsmenge stufenweise immer um 10 % von -70 bis +130 % verändert wurde. Durch eine Unsicherheits- oder auch Fehlerfortpflanzungsanalyse kann bestimmt werden, wie groß der Fehler im Ergebnis des Modells ist, wenn die Eingangsdaten fehlerhaft sind (BRONSTEIN U. A. 1995).

Die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse bezüglich der Wurzellängendichten und Bodenwassergehalte sind in Tab. 5.6 und Tab. 5.7 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Änderung der Niederschläge kaum auf die Simulationen des Bodenwassergehaltes und der Wurzellängendichten auswirkt.

**Tab. 5.6: Sensitivität der Bodenwassergehaltssimulation in Bezug auf Änderungen in den Niederschlagsmengen (a) RMSE der Bodenwassergehaltssimulation und Aufteilung des MSE in Bias und Varianz (b) Korrelation ( $r^2$ ) zwischen gemessenen und simulierten Werten (Ra05: n = 54; Ra06: n = 83; Fi05: n = 60; Fi06 = 138)**

BWG	Referenz	- 10%	- 20%	- 30%	+ 10%	+ 20%	+ 30%
		NS	NS	NS	NS	NS	NS
<u>Rabenberg 2005</u>							
(a)							
RMSE	<b>8.0</b>	8.1	8.3	8.6	7.9	7.7	7.8
MSE	<b>64.2</b>	66.4	69.6	74.2	63.0	62.3	60.4
Bias	<b>5.8</b>	7.5	10.3	13.5	4.1	2.7	1.7
Varianz	<b>58.4</b>	58.9	59.2	55.8	58.9	59.6	58.7
(b)							
$r^2$	<b>0.43</b>	0.44	0.43	0.42	0.44	0.42	0.40
Steigung	<b>0.51</b>	0.52	0.52	0.52	0.51	0.51	0.49
Achsenabschnitt	<b>8.69</b>	8.29	7.81	7.33	9.02	9.61	10.32
<u>Rabenberg 2006</u>							
(a)							
RMSE	<b>9.0</b>	9.1	9.3	9.5	8.8	8.6	8.5
MSE	<b>80.1</b>	83.0	86.3	90.1	77.1	74.8	72.0
Bias	<b>7.5</b>	8.7	10.4	14.4	5.9	4.9	3.2
Varianz	<b>72.6</b>	74.2	75.9	75.7	71.3	69.9	68.7
(b)							
$r^2$	<b>0.60</b>	0.60	0.59	0.60	0.61	0.60	0.57
Steigung	<b>0.80</b>	0.81	0.81	0.82	0.79	0.78	0.76
Achsenabschnitt	<b>1.69</b>	1.25	0.92	0.28	2.11	2.58	3.52
<u>Finkenherd 2005</u>							
(a)							
RMSE	<b>9.3</b>	9.5	9.2	9.1	10.2	10.6	11.0
MSE	<b>87.4</b>	89.9	84.3	82.0	103.2	111.9	120.3
Bias	<b>19.9</b>	19.8	14.7	11.7	30.4	36.6	42.3
Varianz	<b>67.4</b>	70.1	69.7	70.3	72.8	75.3	78.0
(b)							
$r^2$	<b>0.35</b>	0.37	0.37	0.39	0.33	0.31	0.30
Steigung	<b>0.53</b>	0.54	0.55	0.56	0.53	0.52	0.52
Achsenabschnitt	<b>14.3</b>	13.1	13.2	12.5	15.3	16.0	16.5
<u>Finkenherd 2006</u>							
(a)							
RMSE	<b>9.7</b>	9.7	9.7	9.7	9.9	10.4	10.6
MSE	<b>94.9</b>	94.6	93.3	94.1	98.7	108.0	113.0
Bias	<b>12.8</b>	11.1	5.9	0.84	15.2	18.5	22.1
Varianz	<b>82.0</b>	83.5	87.4	93.2	83.5	89.6	90.5
(b)							
$r^2$	<b>0.33</b>	0.35	0.34	0.34	0.29	0.28	0.26
Steigung	<b>0.65</b>	0.68	0.69	0.71	0.62	0.63	0.61
Achsenabschnitt	<b>11.0</b>	10.4	9.3	7.3	12.2	12.4	13.3

**Tab. 5.7: Sensitivität der Wurzellängendichtesimulation in Bezug auf Änderungen in den Niederschlagsmengen (a) RMSE der Wurzellängendichtesimulation und Aufteilung des MSE in Bias und Varianz (b) Korrelation ( $r^2$ ) zwischen gemessenen und simulierten Werten (Ra05: n = 56; Ra06: n = 80; Fi05: n = 94; Fi06 = 124)**

WLD	Referenz	- 10%	- 20%	- 30%	+ 10%	+ 20%	+ 30%
		NS	NS	NS	NS	NS	NS
<u>Rabenberg 2005</u>							
(a)							
RMSE	<b>1.15</b>	1.15	1.15	1.13	1.14	1.14	1.14
MSE	<b>1.31</b>	1.32	1.32	1.29	1.30	1.30	1.29
Bias	<b>0.47</b>	0.44	0.42	0.41	0.48	0.50	0.50
Varianz	<b>0.85</b>	0.88	0.90	0.88	0.82	0.80	0.79
(b)							
$r^2$	<b>0.90</b>	0.91	0.91	0.90	0.91	0.90	0.90
Steigung	<b>0.66</b>	0.67	0.67	0.67	0.65	0.65	0.64
Achsenabschnitt	<b>0.32</b>	0.32	0.32	0.32	0.33	0.34	0.34
<u>Rabenberg 2006</u>							
(a)							
RMSE	<b>1.23</b>	1.21	1.18	1.15	1.23	1.26	1.24
MSE	<b>1.50</b>	1.46	1.38	1.31	1.51	1.59	1.54
Bias	<b>0.52</b>	0.55	0.59	0.64	0.50	0.51	0.47
Varianz	<b>0.98</b>	0.91	0.79	0.68	1.01	1.08	1.08
(b)							
$r^2$	<b>0.90</b>	0.90	0.89	0.88	0.91	0.91	0.91
Steigung	<b>0.65</b>	0.63	0.61	0.58	0.66	0.67	0.68
Achsenabschnitt	<b>0.36</b>	0.37	0.40	0.43	0.34	0.33	0.32
<u>Finkenherd 2005</u>							
(a)							
RMSE	<b>1.17</b>	1.16	1.16	1.15	1.17	1.17	1.18
MSE	<b>1.37</b>	1.35	1.34	1.32	1.37	1.38	1.39
Bias	<b>0.77</b>	0.73	0.70	0.67	0.78	0.81	0.84
Varianz	<b>0.60</b>	0.62	0.64	0.65	0.59	0.57	0.55
(b)							
$r^2$	<b>0.72</b>	0.72	0.72	0.72	0.73	0.73	0.74
Steigung	<b>0.75</b>	0.76	0.76	0.76	0.75	0.74	0.73
Achsenabschnitt	<b>0.17</b>	0.17	0.17	0.18	0.18	0.19	0.19
<u>Finkenherd 2006</u>							
(a)							
RMSE	<b>0.94</b>	0.94	0.94	0.95	0.95	0.96	0.96
MSE	<b>0.89</b>	0.89	0.89	0.91	0.91	0.91	0.92
Bias	<b>0.28</b>	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
Varianz	<b>0.61</b>	0.60	0.61	0.63	0.63	0.63	0.64
(b)							
$r^2$	<b>0.65</b>	0.65	0.65	0.64	0.65	0.65	0.65
Steigung	<b>0.63</b>	0.63	0.64	0.65	0.64	0.64	0.64
Achsenabschnitt	<b>0.39</b>	0.39	0.39	0.38	0.39	0.38	0.38

Der RMSE der simulierten Bodenwassergehalte und Wurzellängendichten variiert in beiden Versuchsjahren und für beide Versuchsschläge nur äußerst gering. Die Spannweiten für den RMSE der simulierten Bodenwassergehalte bewegen sich zwischen 0.9 und 1.9 Vol%, für die Wurzellängendichten zwischen 0.01 und 0.11 cm cm<sup>-3</sup>. Bei Änderungen der Niederschlagsmengen von bis zu -30 bzw. +30 % wären deutlichere Auswirkungen auf die beiden Variablen zu erwarten gewesen. Bei Betrachtung der Werte für Bias und Varianz ist festzustellen, dass sich tendenziell eher eine Verringerung der Niederschläge um 20 und 30 % auf die Simulationsergebnisse auswirkt. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen HEINEMANN, HOOGENBOOM, CHOJNICKI 2002, die in ihrer Studie feststellen konnten, dass die Unterschätzung von Niederschlagsdaten einen größeren Einfluss auf Mittelwerte und Variabilität der simulierten Variablen wie Ertrag, Biomasse, Evaporation und Drainage hatten als eine Überschätzung des Niederschlages.

Das im CERES-Modell enthaltene, eindimensionale Bodenwassermodell sowie die Wurzelwachstumsroutine sind unter den getesteten Bedingungen offensichtlich nicht in der Lage, angemessen auf variable Standortbedingungen - insbesondere auf variable Bodenbedingungen und Niederschläge - zu reagieren. Dies macht das Modell besonders für eine Anwendung im Zusammenhang mit Präzisionslandwirtschaft unter den vorliegenden Bedingungen ungeeignet.

## **6 Methodischer Vorschlag für ein GIS-basiertes Modell zur hoch auflösenden Bereitstellung von Bodendaten auf Basis der Dempster-Shafer Theorie**





## 6.1 Einleitung

Die Qualität der Ergebnisse von Pflanzenwachstums- und Ertragssimulationsmodellen hängt in hohem Maße von der Qualität und Verfügbarkeit der Eingangsdaten ab: je hoch auflösender hochqualitative Eingangsdaten vorliegen, desto genauer kann die existierende Heterogenität von Boden und Pflanzenbeständen erfasst und damit die Simulationsergebnisse eines Modells umso besser der Realität angenähert werden. Die Erfassung von Eingangsdaten in der nötigen räumlichen und zeitlichen Auflösung ist in der Regel mit einem hohen zeitlichen, finanziellen und auch personellen Aufwand verbunden. Um z. B. die Bodenprobenahme und den damit verbundenen Aufwand zu reduzieren und gleichzeitig qualitativ hochwertige und für ein Untersuchungsgebiet repräsentative Proben zu erhalten, können insbesondere Methoden der Geostatistik genutzt werden, da mit diesen räumliche Zusammenhänge von gemessenen Daten quantifiziert und auf unbeprobte Areale übertragen werden können (ISAACS, SRIVASTAVA 1990). Allerdings ergaben geostatistische Auswertungen zahlreicher Feldstudien, dass für eine Extrapolation in unbeprobte Flächen Probenahmedistanzen notwendig sind, die nicht mit einem realistischen Praxisaufwand gewährleistet werden können (FROGBROOCK U. A. 1999; HERBST, LAMP 2004; MCBRATNEY, PRINGLE 1997; VIERA 1999). Daher sind sowohl Methoden für eine einfache und schnelle Erfassung von hochauflösenden Bodendaten als auch effiziente entscheidungsunterstützende Tools zur Datenanalyse notwendig. Zur Multidatenfusion und Datenauswertung existieren zahlreiche Werkzeuge, wie z. B. multivariate adaptive Regression Trees oder Regression Splines und neuronale Netzwerke ebenso wie harte und weiche Klassifizierungsmethoden, zu denen beispielsweise Clustering, Maximum Likelihood oder die Bayessche Wahrscheinlichkeitstheorie zählen (BEHRENS U. A. 2005; BEHRENS, SCHOLTEN 2005; GORDON, SHORTCLIFFE 1985; VAN MEIRVENNE, COCKX, VITHARANA 2005; SOMMER U. A. 2003; SRINIVASAN, RICHARDS 1990). Klassifizierungsmodelle sind im Vergleich zu Regressionsmodellen insbesondere zur Unterscheidung nicht metrischer komplexer Strukturen und Muster nützlich, wie sie z. B. im Zusammenhang mit Boden und seinen Eigenschaften auftreten. Im Gegensatz zu harten Klassifizierungsmethoden verzichten weiche Methoden darauf, definitive Aussagen über das Zutreffen einer Hypothese zu machen. Stattdessen wird der Grad der Wahrscheinlichkeit angegeben, dass eine Hypothese zutreffend ist, z. B. der Grad der Wahrscheinlichkeit, dass an einem bestimmten Punkt in einer Landschaft oder auf einem Ackerschlag ein bestimmter Bodentyp auftreten wird. Die Theorie nach Dempster und Shafer ist eine Erweiterung der Bayesschen Wahrscheinlichkeitstheorie und zählt zu den weichen Klassifizierungsmethoden. Ein Vorteil der Theorie ist, dass für

einzelne Orte nicht nur eine, sondern auch mehrere Hypothesen bzw. eine Menge mit mehreren Hypothesen unterstützt werden kann (DOBERS, STUCZYNSKI 2005) und so beispielsweise Mischsignaturen bzw. Übergänge zwischen unterschiedlichen Bodentypen potenziell ermittelt werden können. Ein weiterer Vorteil im Vergleich zu anderen weichen Klassifizierungen, wie z. B. der im Bereich der Bildanalyse weithin angewandten Fuzzy Logic, liegt darin, die Anzahl der Hypothesenmenge bei Zunahme der Evidenzen eingrenzen zu können (SHAFFER 1976). Existieren z. B. sehr viele Möglichkeiten, Objekte in Klassen einzuordnen und ist die Evidenz zur Entscheidung, welche Objekte welcher Klasse zugeordnet werden, widersprüchlich oder fehlerhaft, ist eine Eingrenzung der Möglichkeiten nötig, bis eine Objektmenge ermittelt wird, die am Besten die Kategorie von Interesse charakterisiert (LEIN 2003). Des Weiteren besitzt die Dempster-Shafer-Theorie den großen Vorteil, dass menschliche Beurteilung in den Klassifizierungsprozess einfließen kann, deren signifikante Rolle z. B. bei der Bildklassifizierung häufig unterschätzt wird (FOODY 1999). Auf diese Weise kann vorhandenes Expertenwissen in den Prozess der Modellbildung integriert werden. Diese deduktive Steuerungsfunktion ermöglicht es, das Modellergebnis richtungsweise zu beeinflussen. Pflanzenwachstum und -entwicklung sind eng mit Bodeneigenschaften, wie der Wasserspeicherfähigkeit, der pflanzenverfügbaren Bodenwassermenge oder dem Nährstoffspeicher- und -nachliefervermögen verbunden. Diese Bodeneigenschaften variieren innerhalb eines Schalles, so dass je nach Landschaft eine mehr oder weniger ausgeprägte Heterogenität des Bodens existiert. Die Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit ist eine Technologie, die die Möglichkeit zur Identifizierung von bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften und somit zur Identifizierung der räumlichen Bodenheterogenität bietet (CORWIN, LESCH 2005b; CORWIN, LESCH 2005a). Ziel ist gewesen, auf Basis der Dempster-Shafer-Theorie unter Nutzung von Bodenleitfähigkeitsdaten sowie Informationen zu Textur, Bodentyp und Wasserstatus ausgewählter Monitoringpunkte auf dem Versuchsschlag Rabenberg in Niedersachsen ein GIS-basiertes Modell zu entwickeln, das in der Lage ist, hochauflösende Informationen über das Auftreten der oben genannten Informationen zur Verfügung zu stellen.

## 6.2 Material und Methoden

### 6.2.1 Theorie nach Dempster und Shafer

In der Wahrscheinlichkeitslehre wird einer Aussage ein bestimmtes Maß an Vertrauen in das Zutreffen einer Hypothese (*Belief*) zugeordnet, ohne das Nichtzutreffen der Hypothese (*Disbelief*) zu berücksichtigen. Im Gegensatz dazu berücksichtigt die Dempster-Shafer-Theorie (DS-Theorie) sowohl den Belief (*Bel*) als auch den Disbelief (*Disbel*) einer Hypothese. Zur Illustration wird ein erläuterndes Beispiel aufgeführt:

Angenommen, an einem bestimmten Punkt auf einem Ackerschlag kommt laut Bodenkarte eine Braunerde vor. Wird weiter angenommen, dass der Bodenkarte zu 85 % vertraut werden kann, heißt das, dass die Karte in 85 % aller Fälle eine zutreffende Aussage macht. Unter Anwendung der herkömmlichen Wahrscheinlichkeitslehre könnte daraus geschlossen werden, dass mit einer Wahrscheinlichkeit von 15 % an dem Punkt keine Braunerde auftritt. Nach der Theorie von Dempster und Shafer ist jedoch nicht sicher, dass die Hypothese nicht zutrifft. Da in 85 % der Fälle die Aussage der Bodenkarte mit Sicherheit zutreffend ist, ist sie es in 15 % der Fälle nicht mit Sicherheit. Es könnte also in 15 % der Fälle an dem Punkt ein anderer Bodentyp oder aber auch eine Braunerde vorkommen.

In der DS-Theorie wird häufig der Ausdruck *frame of discernment*  $\theta$  (FOD) gebraucht, der die Menge aller möglichen, sich gegenseitig ausschließenden Ergebnisse darstellt. Wenn eine Menge von  $n$  Ergebnissen vorliegt, erhält man  $2^n - 1$  Teilmengen von  $\theta$ , also  $2^n - 1$  mögliche Hypothesen, die gegebenenfalls berücksichtigt werden müssen.

In der Wahrscheinlichkeitslehre wird das Maß der Wahrscheinlichkeit einzelnen Werten zugeordnet:

$$p(\neg A) = 1 - p(A) \quad (5.1)$$

Das heißt, die Wahrscheinlichkeit, dass eine Hypothese nicht korrekt ist, ergibt sich aus der Subtraktion der Wahrscheinlichkeit, dass die Hypothese korrekt ist, von 1. Im Gegensatz dazu werden die Maße für die Wahrscheinlichkeit in der Theorie nach Dempster und Shafer den Teilmengen von  $\theta$  zugeordnet. Anstelle eines einzelnen Wertes wird ein Wahrscheinlichkeitsbereich verwendet, der nach unten durch den Belief und nach oben durch die Plausibilität ( $1 - \text{Disbel}$ ) der Hypothese, also durch die Wahrscheinlichkeit begrenzt wird, mit der angenommen werden kann, dass eine Hypothese korrekt ist. Dieser Bereich, das *basic probability assignment* (*BPA*;  $m$ ), bringt die Stärke zum Ausdruck, mit der eine bestimmte Hypothese angenommen wird. Die Summe aller  $m$  ergibt dabei 1.

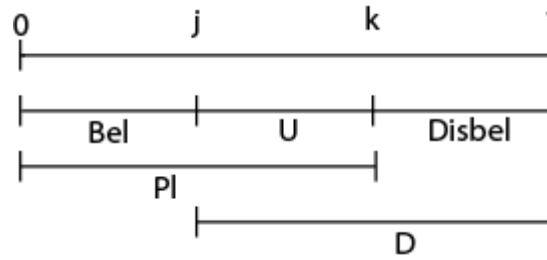


Abb. 6.1: Das Belief-Intervall (nach: KONAR 2005: Computational Intelligence. Springer, Berlin)

Wenn beispielsweise der FOD  $\theta$  sich gegenseitig ausschließende Teilmengen enthält, dann ergeben sich Belief und Plausibilität aus der Summe aller  $m$  der möglichen Hypothesen:

$$Bel(X) = \sum m(Y) \quad \text{wobei } Y \subseteq X \quad (5.2)$$

$$Pl(X) = \sum m(Y) \quad \text{wobei } Y \cap X \neq \emptyset \quad (5.3)$$

Der Belief einer Hypothese wird durch das Belief-Intervall repräsentiert, das im Bereich von 0 bis 1 liegt und im Intervall 0.1 angegeben wird. Das Intervall wird von zwei Punkten  $j$  und  $k$  ( $k \geq j$ ) unterteilt. Das Konzept des Belief-Intervalls beinhaltet neben Belief und Disbelief einer Hypothese auch noch die Unsicherheit (*uncertainty*,  $U$ ), die Plausibilität (*plausibility*;  $Pl$ ) sowie den Zweifel (*doubt*;  $D$ ) und ist in Abb. 6.1 beschrieben. Soll das Belief-Intervall beispielsweise die Hypothese  $A$  beschreiben, so ist das Unterintervall von 0 bis  $j$  der Belief von  $A$  und das Unterintervall von  $k$  bis 1 der Disbelief von  $A$ . Der Restbetrag des Intervalls von  $j$  bis  $k$  beschreibt die so genannte Unsicherheit. Belief ( $A$ ) gibt den Grad an, mit dem die Hypothese angenommen werden kann, Disbelief ( $A$ ) denjenigen, mit dem  $\neg A$  angenommen werden kann, und Uncertainty ( $A$ ) ist das Maß, mit dem weder das eine noch das andere für  $A$  angenommen werden kann. Werden neue Evidenzen einbezogen, wird die Unsicherheit kleiner und Belief oder Disbelief größer. Aus der Abbildung ist weiterhin ersichtlich, dass:

- $Pl(A) = Bel(A) + U(A)$
- $D(A) = Disbel(A) + U(A)$
- $PL(A) \geq Bel(A)$
- $Pl(A) + Pl(\neg A) \geq 1$  sowie
- $Bel(A) + Bel(\neg A) \leq 1$  ist.

Und weiterhin, wenn  $A$  eine Teilmenge von  $B$  ist, dass:

- $Bel(A) \leq Bel(B)$  und
- $Pl(A) \leq Pl(B)$  ist.

Sind nun z. B. die Evidenzen für verschiedene Hypothesen aus zwei unterschiedlichen Informationsquellen  $Q1$  und  $Q2$  mit den daraus resultierenden  $FOD$   $\theta_1$  und  $\theta_2$  und den dazugehörigen  $BPA$   $m1(.)$  und  $m2(.)$  gegeben, so kann das neue  $BPA$   $m^*(.)$ , basierend auf  $m1(.)$  und  $m2(.)$ , über folgende Formel berechnet werden:

$$m(X) = \frac{\sum m_1(X_i) \cdot m_2(X_j)}{1 - \sum m_1(X_i) \cdot m_2(X_j)} \quad (5.4)$$

wobei für den Zähler  $X = X_i \cap X_j$  und für den Nenner  $X_i \cap X_j = \emptyset$  gilt.

Für jede Hypothese können das neue Belief und die Plausibilität über die Formeln 5.2 und 5.3 berechnet werden. Die Summierung von mehr als zwei Belief-Funktionen erfolgt analog.

### 6.2.2 Scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens

Für die Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit des Bodens (ECa; apparent electrical conductivity) wurde der EM38-Sensor der Firma Geonics (Kanada) genutzt. Das Gerät arbeitet nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion und schickt über eine Sendespule elektromagnetische Wellen in den Boden, die einen schwachen Wechselstrom erzeugen. Dieser wiederum induziert Änderungen des Magnetfeldes im Boden, die von einer Empfangsspule gemessen werden und direkt proportional zur elektrischen Leitfähigkeit sind, die üblicherweise in Millisiemens je Meter (mS/m) angegeben wird. Die Messtiefe von Geräten, die mit elektromagnetischer Induktion arbeiten, ist abhängig von Spulenabstand, Orientierung der Spulen, Frequenz, Abstand zum Erdboden und der Bodenschichtung. Da beim EM38 der Spulenabstand und die Frequenz unveränderlich sind und sich die Sensitivität des EM38-Signals in Abhängigkeit von der Spulenausrichtung mit der Tiefe ändert, wurde die Messtiefe durch die Spulenorientierung beeinflusst (horizontaler bzw. vertikaler Messmodus). Die Sensitivität der Messungen ist im Vertikalmodus im Bereich von ca. 40 % der Spulendistanz am höchsten (DURLESSER 1999). Im horizontalen Modus nimmt die Sensitivität des Signals von der Bodenoberfläche an kontinuierlich ab, wobei ca. 55 % des Signals aus den oberen 30 cm des Bodens kommen (MCNEILL 1980). Die Messtiefe des Gerätes beträgt in einem homogenen Bodenprofil im Vertikalmodus ca. 1.5 - 2.0 m, im Horizontalmodus ca. 0.8 - 1.0 m (LESCH, CORWIN, ROBINSON 2005).

Die theoretischen Sensitivitätskurven des Messsignals sind für homogene Medien kalibriert, was ein Hauptproblem bei der Nutzung dieser Funktion für die Vorhersage von Bodenschichtung über gewichtete Faktoren aus beiden Messmodi ist. Die Stärke von elektrischen Strömen im Boden hängt unter gemäßigten humiden (und nicht versalzten) Bedingungen

hauptsächlich von der Bodenfeuchte und dem Tongehalt bzw. der Texturklasse ab, da die Ionen geladene Sternschicht und die negativ geladenen Oberflächen der Tonminerale die Hauptleiter für Strom im Boden sind (HERBST, LAMP 2006). Die Wechselwirkung zwischen den beiden Parametern Ton- und Bodenwassergehalt kann genutzt werden, um Texturklassen und Bodenfeuchtestufen oder auch einen mittleren Tongehalt über das Bodenprofil mit relativ guter Reproduzierbarkeit in die Fläche zu erfassen (DURLESSER 1999; HERBST 2002).

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit ist für die überwiegend tonhaltigen Böden des Betriebes Träger-Farny daher als Eingangsdatum für das vorgeschlagene Modell gut geeignet. Für andere Landschaften müssen andere oder zusätzliche Daten, wie z. B. digitale Höhenmodelle und Luftbilder, als Eingangsdaten genutzt werden.

### 6.2.3 Datenaufbereitung und -verarbeitung

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit wurde zu zwei Zeitpunkten (multitemporal), im April und im August 2005, sowohl im horizontalen als auch im vertikalen Modus (multimodal) in den Fahrspuren des Versuchsschlages erfasst. Die Interpolation der Leitfähigkeitsdaten erfolgte mit der Software VESPER (Variogram Estimation and Spatial Prediction with Error), die vom Australian Centre for Precision Agriculture (ACPA) zur Interpolation von hochauflösenden Sensordaten entwickelt wurde (MINASNY, MCBRATNEY, WHELAN 2005). Das Programm führt ein Kriging mit lokaler Variogrammanpassung durch. Beim Kriging wird auf Grundlage der in theoretischen Variogrammen beschriebenen Zusammenhänge die räumliche Verteilung der betrachteten Daten geschätzt. Der Wert der Schätzvariablen an einem unbeprobten Ort wird dabei durch ein gewichtetes Mittel der benachbarten gemessenen Werte errechnet. Grundlage für die Schätzung sind das geostatistische Modell und das Variogramm, das den räumlichen Zusammenhang des Prozesses beschreibt. Die lokalen Variogramme werden in VESPER automatisch durch die nicht lineare Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Die mittleren Krigingvarianzen der vier Messungen unterscheiden sich nur gering und liegen für die Messungen im April im Horizontalmodus bei 0.6, im Vertikalmodus bei 0.8 mS/m, für die Messungen im August liegen die Werte im Horizontal- und Vertikalmodus bei 0.5 bzw. 1.01 mS/ m. Die so interpolierten Leitfähigkeitsdaten bildeten die Eingangsdaten für das Modell zur Belief-Klassifizierung, für die das im Modul MAXSET des GIS-Systems Idrisi Kilimanjaro (EASTMAN 2003) enthaltene Dempster-Shafer-Modell genutzt wurde. Das Modul MAXSET nutzt zur Schätzung unbekannter Parameter die sogenannte Maximum-Likelihood-Methode. Sie erlaubt eine möglichst genaue Schätzung von unbekannten Parametern auf Grundlage von bekannten Stichprobenwerten. Dabei wird die

Wahrscheinlichkeit maximiert, dass der geschätzte Parameter die beobachteten Ergebnisse in der Stichprobe verursacht hat.

Für das Modul MAXSET mussten zunächst sogenannte Trainingsareale definiert werden. Solche Trainingsdatensätze können z. B. über Clustering bestimmt oder aber manuell digitalisiert werden, wie es bei dieser Untersuchung der Fall war. Die manuelle Bestimmung wurde durchgeführt, um das *a priori*-Wissen in den Klassifizierungsprozess einfließen zu lassen, was bei Nutzung der automatischen Bestimmung nicht möglich gewesen wäre. Unter Berücksichtigung von Daten aus Profilaufnahmen und Bodenanalysen sowie Leitfähigkeitsdaten wurden die Trainingsareale *a* bis *i* festgelegt und digitalisiert (Abb. 6.2). Die Areale sind inhaltlich in Tab. 6.1 beschrieben (Abkürzungen für Bodentyp, Bodenartengruppe und Bodenartenhauptgruppe nach KA5), zusätzliche Erläuterungen zu den Wasserstatusklassen sind Tab. 6.2 zu entnehmen. Nach der Definition der Trainingsareale wurde die *a priori*-Wahrscheinlichkeit für jedes Areal festgelegt und so eine inhaltliche Gewichtung der Areale vorgenommen, indem deren geschätzte Häufigkeit des Auftretens in der Fläche berücksichtigt wurde. Die *a priori*-Wahrscheinlichkeiten für die einzelnen Trainingsareale sind der Tab. 6.3 zu entnehmen.

Die bedingte oder auch *a posteriori*-Wahrscheinlichkeit der Evidenz wird im Modell zunächst aus der Varianz-Covarianz-Matrix der Trainingsareale ermittelt und dann durch die *a priori*-Wahrscheinlichkeiten modifiziert. Die Pixelwerte werden dann relativ zum maximalen Wert, der existiert, normalisiert. Auf diese Weise werden die Kommunalitäten der verschiedenen Klassen als Maß für den Grad des Zusammenhangs einer Variablen mit allen anderen Variablen ermittelt:

$$KOM(h / e) = \frac{p(e / h)p(h)}{\max[p(e / h)p(h)]}$$

wobei  $p(h/e)$ : *a posteriori* (bedingte) Wahrscheinlichkeit; Wahrscheinlichkeit, dass

Hypothese bei gegebener Evidenz wahr ist

$p(e/h)$ : Wahrscheinlichkeit, dass Evidenz bei gegebener Hypothese wahr ist

$p(h)$ : *a priori* (unbedingte) Wahrscheinlichkeit; Wahrscheinlichkeit, dass

Hypothese ungeachtet der Evidenz wahr ist.

Die Theorie ist, dass im Bild mindestens ein Pixel existiert, der die entsprechende Klasse vollständig repräsentiert. Die Kommunalitäten werden dann der Größe nach sortiert und die BPA's über die Differenzen zweier aufeinander folgender Kommunalitäten kalkuliert. Das Belief wird schließlich über Aufsummieren der BPA's aller Unterklassen einer Klasse berechnet. Ursprünglich müssen sich für die Anwendung der DS-Theorie die

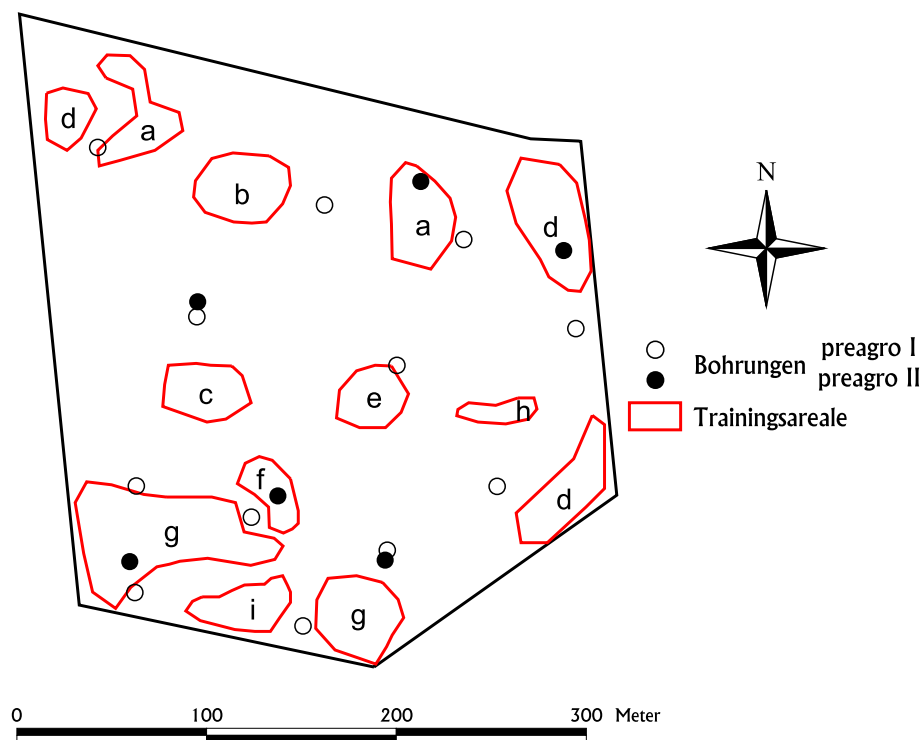


Abb. 6.2: Trainingsareale und Bohrungen auf dem Versuchsschlag Rabenberg

Tab. 6.1: Attribute der Trainingsareale für den Versuchsschlag Rabenberg

Areal	Bodentyp (Abk.)	Bodenartengr. (bis 1.2m)	Bodenartenhauptgr. (bis 1.2m)	Wasserstatus (Klassen)
a	SS	ss, ls	s	3.2
b	SS	ss, ls	s	3.1
c	SS	ls//ss	s	3.2
d	SS	ss, ls//sl	s//l	3.3
e	YK-SS	ss, ls	s	4
f	GG-SS	ss, ls//ut	s//t	5
g	SS	lt	t	3.3
h	SS	ss	s	3.1
i	GG-SS	ls/tl	s/t	5

Tab. 6.2: Bedeutung der Wasserstatusklassen

Klasse	1	2	3	4	5	6
Bedeutung	sehr trocken	trocken	wechsel-feucht	frisch	feucht	nass
		3.1	3.2	3.3		
		trocken	frisch	feucht		

Tab. 6.3: *A priori*-Wahrscheinlichkeiten (APW) für die Trainingsareale a bis i

Areal	a	b	c	d	e	f	g	h	i
APW	0.17	0.12	0.1	0.15	0.12	0.12	0.12	0.05	0.05



Klassen/ Hypothesen gegenseitig ausschließen. In dem verwendeten IDRISI-Modell ist dies nicht der Fall (IDRISI Notes und Handbuch), da so die Möglichkeit besteht, dass ein Pixel auch einer unbekannten Klasse zugeordnet werden kann, für die kein Trainingsdatensatz vorgegeben wurde. Voraussetzung ist, dass zusätzlich zu den Klassen, für die Trainingsareale definiert wurden, eine weitere Klasse mit der Bezeichnung [*Andere*] festgelegt wird. Die Ergebnisse stimmen mit denen der DS-Theorie überein, es wird aber die Möglichkeit berücksichtigt, dass Klassen vorhanden sind, über die kein Wissen vorliegt.

Wenn die BPA-Struktur der Pixel ermittelt ist, können alle damit verbundenen Größen, wie z. B. Plausibilität oder Ignorance, berechnet werden, und es muss eine Entscheidungsregel gewählt werden, mit der die Beobachtungen in Gruppen eingeteilt werden. Die Entscheidungsregeln basieren auf den Evidenzfunktionen für Belief und Plausibilität:

$$Bel(A) = \sum m(H) \quad H \subseteq A$$

$$Pl(A) = \sum m(H) \quad H \cap A \neq \emptyset$$

Das Ergebnis ist eine sogenannte „hard classification“, bei der jedem Pixel die Klasse mit dem höchsten Belief zugeordnet wird. Dieses „hardening“ ist nötig, um praktikable und übersichtliche Karten zu erhalten. Ohne diese Prozedur wären bei neun Klassen, wie es in diesem Beispiel der Fall ist,  $2^9 - 1 = 511$  Möglichkeiten zu berücksichtigen, was weder in einer Karte darstellbar noch interpretierbar wäre.

Obwohl das Modul also wie ein überwachter Klassifikator läuft, da es Trainingsdatensätze benötigt, verhält es sich wie ein unüberwachter Klassifikator, indem es einen Pixel auch einer Signatur zuordnen kann, für die kein Trainingsareal definiert worden ist. Auf diese Weise können so genannte Mischsignaturen entstehen, die im vorliegenden Fall von Interesse sind, da sie die Übergänge zwischen zwei Bodentypen abbilden können.

Die Auswertung der Daten erfolgte für den Versuchsschlag Rabenberg in Groß Twülpstedt (Niedersachsen). Klima, Geogenese und Relief sowie Pedogenese und Bodenverbreitung für dieses Gebiet sind in Kapitel 2 dieser Arbeit beschrieben worden, weshalb an dieser Stelle nicht mehr auf Standortbedingungen und Lage des Versuchsschlages eingegangen wird.

### 6.3 Ergebnisse und Diskussion

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens wird hauptsächlich durch Bodenfeuchte, Tongehalt und Salzkonzentration in der Bodenlösung beeinflusst (DURLESSER 1999; FRIEDMAN 2005; KING U. A. 2003; MCNEILL 1980), aber auch bodenunabhängige Faktoren, wie die Umgebungstemperatur und die Messhöhe haben Einfluss auf das Signal des Messgerätes (SUDDUTH, DRUMMOND, KITCHEN 2001). Die Reaktion des Gerätes auf Wassergehaltsänderungen hängt vom Wasserstatus des Bodens ab: die Leitfähigkeit in trockenen Böden nimmt bei einem 1%igen Anstieg des volumetrischen Bodenwassergehaltes um 6 - 20 % zu, in feuchten Böden dagegen nur um 0 - 3 % (DURLESSER 1999). Außerdem korreliert die ECa besser mit dem Wassergehalt von trockenen Böden als mit dem von feuchten (CARROLL, OLIVER 2005). Um die genannten Effekte zu minimieren, wurde das Messgerät immer in derselben Höhe angebracht und die Messungen im Vertikal- und Horizontalmodus am selben Tag durchgeführt. Der multimodale Ansatz wurde gewählt, um die Unterschiede zwischen oberen (Horizontalmodus) und tiefer liegenden Bodenschichten (Vertikalmodus) zu erfassen. Er basiert auf der Hypothese, dass der Tongehalt des Bodens konstant ist und „dass die Leitfähigkeit an jedem beliebigen Standort variiert, wenn sich Bodenwassergehalt und Temperatur ändern“ (BREVIK, FENTON, LAZARI 2006). Die Unterschiede zwischen den Leitfähigkeiten im Frühjahr und im Sommer weisen demnach auf Unterschiede im Bodenwassergehalt hin. Die interpolierten ECa-Daten sind in Abb. 6.3 dargestellt. Aus der Abbildung ist die Verschiebung der Leitfähigkeitsmuster aufgrund der Bodenaustrocknung deutlich zu sehen. Die im horizontalen Modus gemessenen Leitfähigkeiten spiegeln überwiegend die Verhältnisse im Oberboden wider und sind deutlich niedriger als die im vertikalen Modus erfassten Daten, die die Verhältnisse im Unterboden abbilden. Die Muster sind zu beiden Messterminen und in beiden Messmodi ähnlich: im nördlichen Teil des Schlages treten generell niedrigere Leitfähigkeiten, im südwestlichen Teil hohe Leitfähigkeiten auf (Abb. 6.3). Dieses Muster lässt sich mit der Textur bzw. dem Ton- und Sandgehalt und der damit verbundenen Wasserspeicherkapazität des Bodens erklären: wenn der Boden austrocknet, treten die Effekte des Bodens auf die Wasserspeicherkapazität mehr in den Vordergrund (CARROLL, OLIVER 2005). Die im nördlichen Teil des Schlages überwiegend auftretenden lehmigen Sande und Sande besitzen ein geringeres Wasserspeichervermögen als die im südwestlichen Viertel vorkommenden Lehmtone und Lehme. Eine vergleichbare Erklärung hatten auch CARROLL, OLIVER 2005 für die Ergebnisse ihrer Studie, in der sie feststellten, dass Flächen mit hohen Leitfähigkeitswerten mit hohen Tongehalten korrespondierten und dass hohe Sandgehalte mit

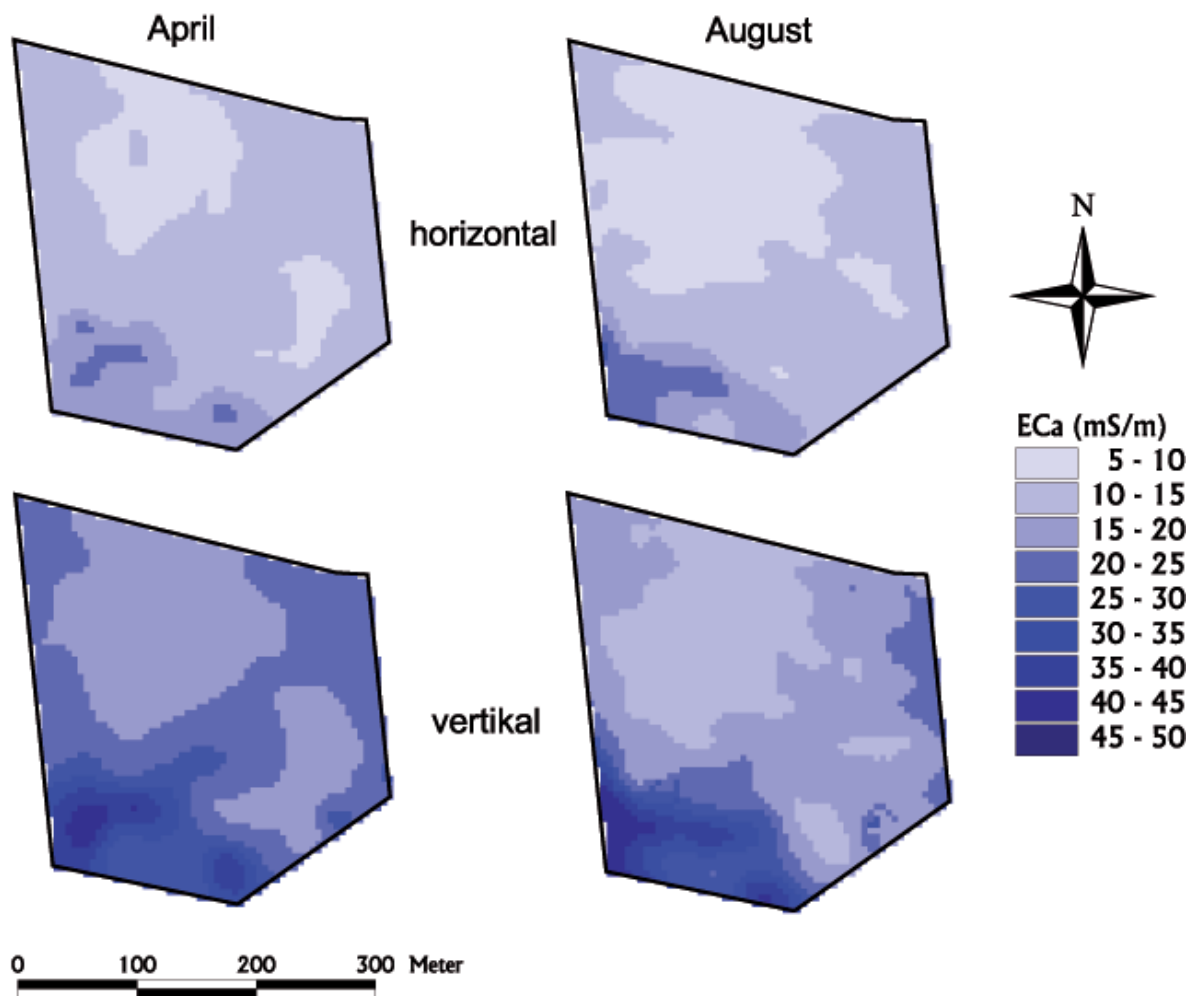


Abb. 6.3: Im Horizontal- und Vertikalmodus gemessene scheinbare elektrische Leitfähigkeit (ECa) in Millisiemens je Meter (mS/m) in den Monaten April und August des Jahres 2005

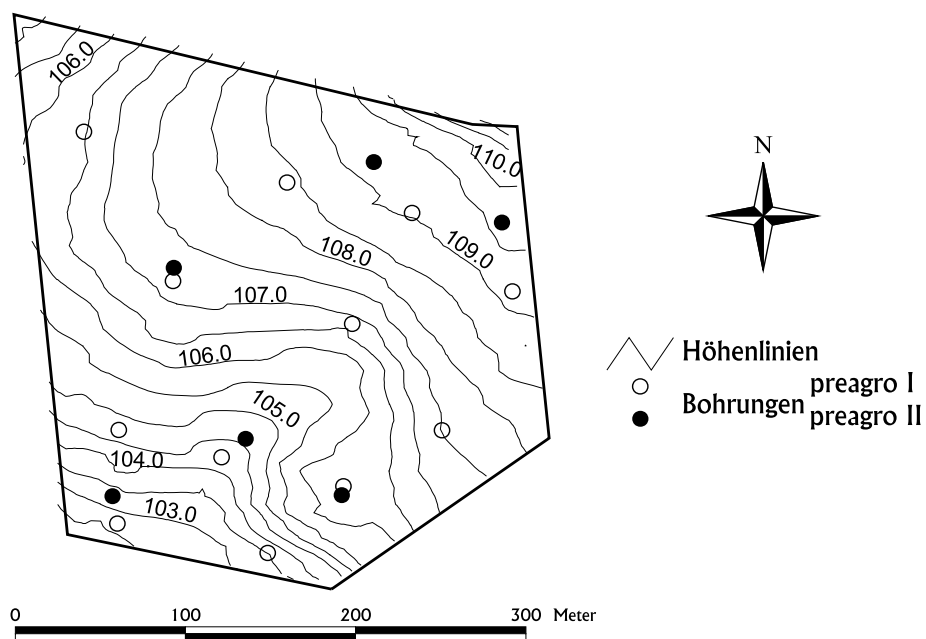
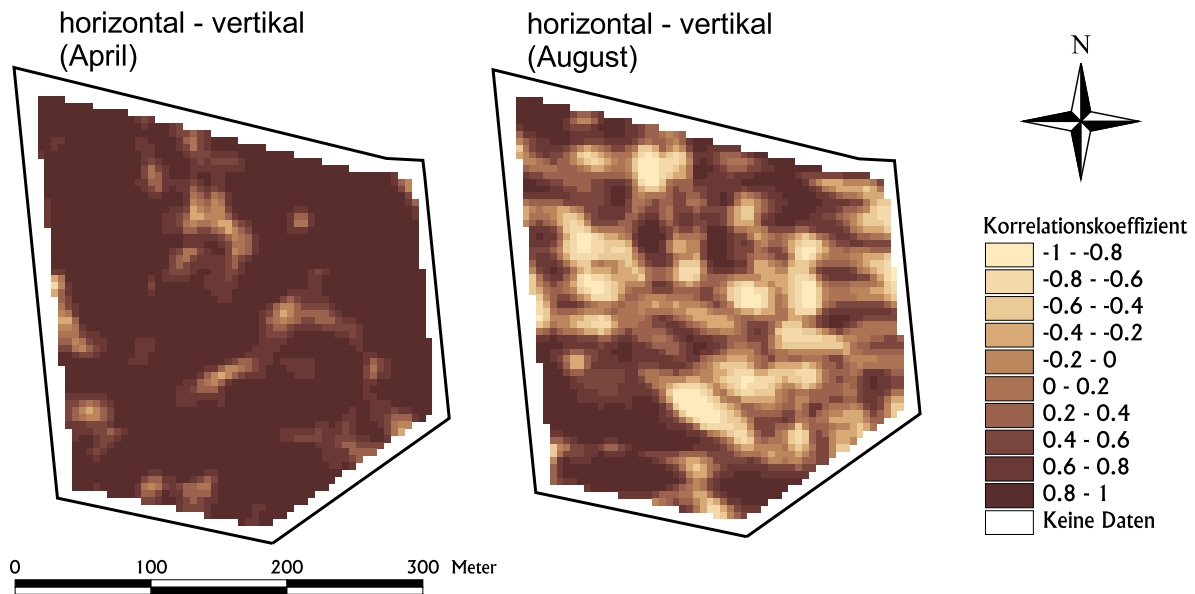
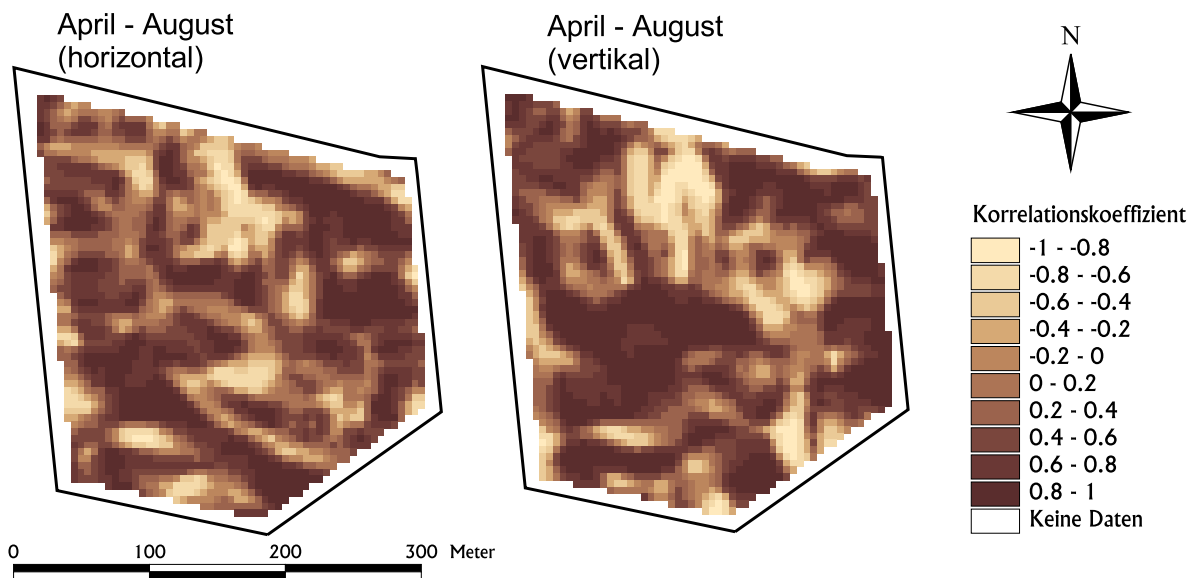


Abb. 6.4: Reliefsituation auf dem Versuchsschlag Rabenberg



**Abb. 6.5: Raumkorrelation zwischen den ECa-Werten aus Horizontal- und Vertikalmessmodus zu den jeweiligen Messzeitpunkten April und August**



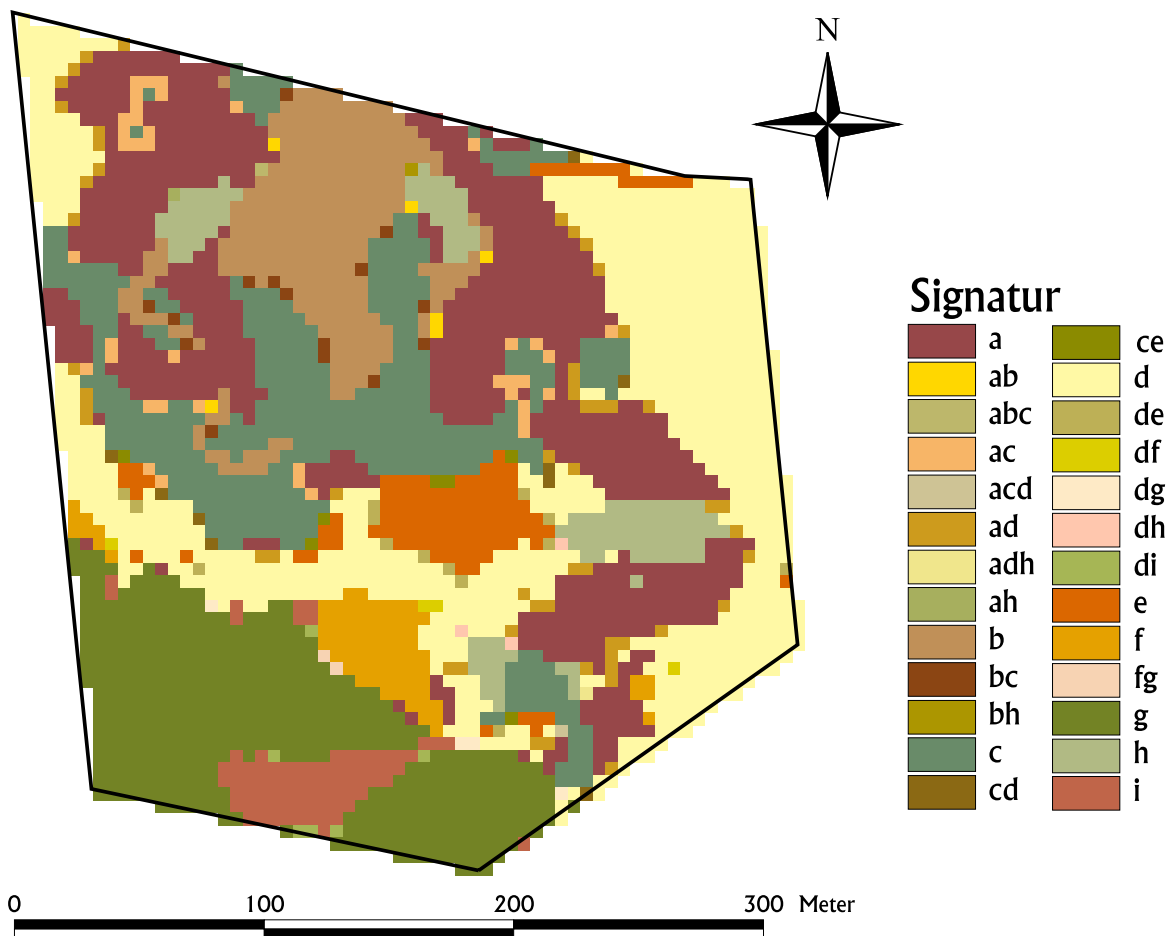
**Abb. 6.6: Raumkorrelation zwischen den ECa-Werten von April und August aus den jeweiligen Messmodi horizontal und vertikal**

niedrigen Leitfähigkeiten assoziiert waren (vgl. auch LESCH, CORWIN, ROBINSON 2005), was sie mit dem geringeren Leit- und Wasserspeichervermögen der Sande erklärten. Hinzu kommt im vorliegenden Fall die Reliefsituation auf dem Versuchsschlag Rabenberg: Wie aus Abb. 6.4 ersichtlich, fällt der Schlag vom nordöstlichen zum südwestlichen Teil hin deutlich ab, so dass durch die reliefbedingte Fließrichtung höhere Wassergehalte am südwestlichen Schlagrand bedingt sind. CORWIN, LESCH 2005b stellten fest, dass eine minimale Komplexität in den Leitfähigkeitsmustern auftritt, wenn (a) die Variabilität der Textur minimal ist, (b) die

Texturänderungen im Feld weich und sukzessive verlaufen und (c) Textur und Wassergehalt stark korrelieren. Um den engen Zusammenhang zwischen den Leitfähigkeiten der beiden Messmodi und der beiden Erfassungszeiträume zu verdeutlichen, wurden Raumkorrelationen berechnet. Abb. 6.5 und Abb. 6.6 zeigen die Raumkorrelationen zwischen den ECa-Werten aus Horizontal- und Vertikalmodus zu den jeweiligen Messzeitpunkten April und August sowie zwischen den ECa-Werten von April und August aus den jeweiligen Messmodi.

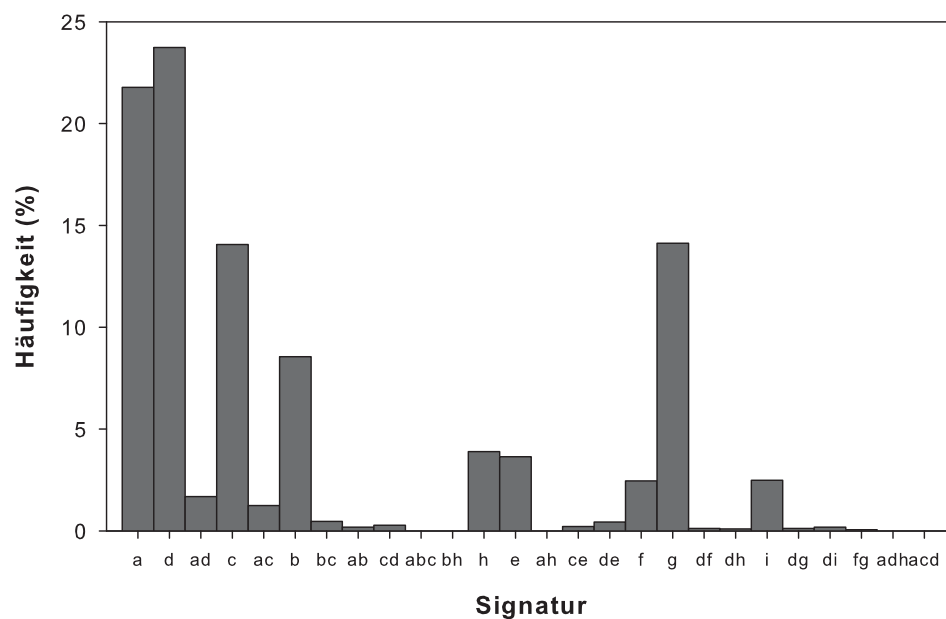
Die Abbildungen zeigen, dass die Korrelationskoeffizienten überwiegend hoch (0.6 bis 1.0 bzw. -0.6 bis -1.0), die Korrelationen aber sowohl positiv als auch negativ sind. Die hohen positiven Korrelationen zwischen den ECa-Werten aus beiden Messmodi im April lassen sich mit der hohen Wassersättigung des Bodens erklären. Im Frühjahr sind die Wassergehalte des Ober- und Unterbodens gewöhnlich sehr hoch, so dass in beiden Messmodi entsprechend hohe Messwerte auftreten (Abb. 6.3), was zu einer hohen positiven Korrelation führt. Die positiven und negativen Korrelationen zwischen den ECa-Werten aus beiden Messmodi im August hingegen lassen sich über die zunehmende Austrocknung des Bodens im Sommer erklären, die von den oberen zu den tiefer gelegenen Bodenschichten erfolgt. Das heißt, der Unterboden (= ECa-Werte aus dem Vertikalmodus) enthält im Vergleich zum Oberboden (= ECa-Werte aus dem Horizontalmodus) mehr Wasser, was sich in höheren Leitfähigkeitswerten zeigt (siehe auch Abb. 6.3). Die negativen Korrelationen treten insbesondere dort auf, wo sandige Texturen vorkommen, die ein geringeres Wasserspeichervermögen besitzen als die bindigeren Texturen und dementsprechend schneller austrocknen. In diesen Arealen stehen niedrige Leitfähigkeitswerte aus dem Oberboden höheren Leitfähigkeitswerten aus dem Unterboden gegenüber, was zu negativen Korrelationen führt. Die positiven Korrelationen zwischen den Daten aus beiden Messmodi im August treten vor allem in den südwestlichen Arealen des Schlages auf, in denen tonreiche Böden vorkommen, die aufgrund ihrer besseren Wasserspeicherfähigkeit weniger schnell austrocknen und daher sowohl im Ober- als auch im Unterboden noch verhältnismäßig hohe Leitfähigkeitswerte aufweisen.

Auf ähnliche Weise lassen sich die Korrelationen zwischen den ECa-Werten aus den jeweiligen Messmodi erklären (Abb. 6.6). Die Areale mit negativen Korrelationen stellen solche Flächen dar, die im Sommer deutlich trockener waren als im Frühjahr. Die Areale mit positiven Korrelationen repräsentieren die Flächen, auf denen die Unterschiede im Wassergehalt zwischen April und August nicht so deutlich waren. Abb. 6.7 zeigt als Ergebnis der Modellierung die Verteilung der Signaturen auf dem Versuchsschlag Rabenberg. Neben den durch die Trainingsareale definierten Monosignaturen *a* bis *i* wurden 17 weitere Mischsignaturen ermittelt, die, wie erwartet, in den Übergangsbereichen zwischen zwei oder

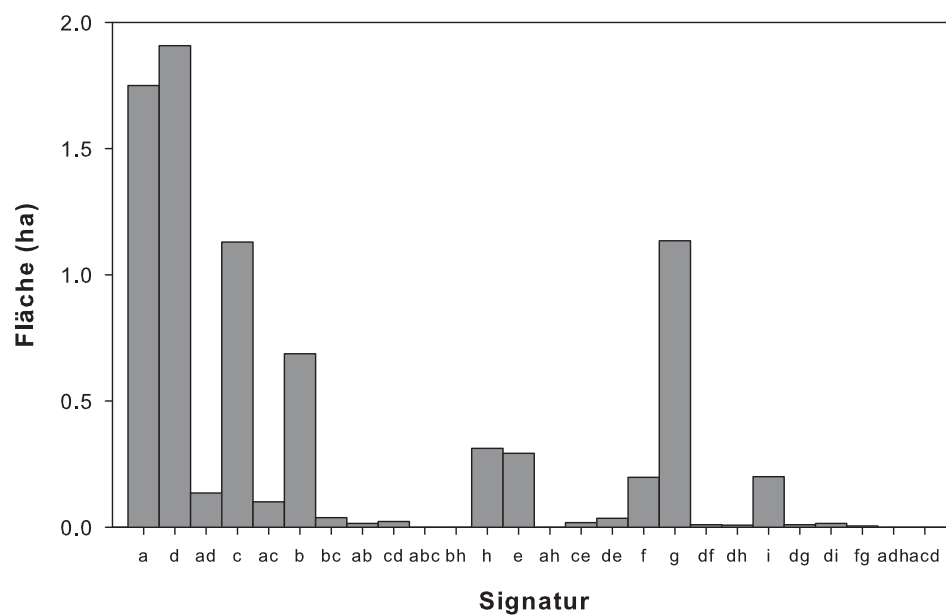


**Abb. 6.7: Karte der Signaturen für den Versuchsschlag Rabenberg**

mehreren Monosignaturen auftreten. Aufgrund der hohen Tongehalte bzw. des unterschiedlich hoch anstehenden Tons im Untergrund treten auf dem Versuchsschlag vorwiegend staunässebeeinflusste Böden auf. Aus Abb. 6.8 und Abb. 6.9 ist ersichtlich, dass die Signatur *d* am häufigsten auftritt. Sie nimmt mit ca. 24 % (1.9 ha) knapp ein Viertel der gesamten Schlagfläche, die ca. 8 ha beträgt, ein und repräsentiert feuchte Pseudogleye aus Sand oder Lehmsand über tiefem Sandlehm (Tab. 6.1). Diese Böden treten zum einen an den westlichen und östlichen Schlagrändern auf und bilden zum anderen den Übergang von den sandigen Substraten im nördlichen Teil zu den tonigen Substraten im südwestlichen Viertel des Schlags (Abb. 6.7). Neben dieser Signatur *d* nimmt die Signatur *a* mit ca. 22 % (1.75 ha) einen weiteren großen Teil der Schlagfläche ein. Sie repräsentiert frische Pseudogleye aus Sand oder Lehmsand und tritt vorwiegend im nordöstlichen sowie im westlichen Teil des Schlags von Norden nach Süden entlang der Signatur *d* auf (Tab. 6.1 und Abb. 6.7 - Abb. 6.9). Die Signaturen *b*, *c* und *h* repräsentieren trockene bis frische Pseudogleye aus Sand oder Lehmsand bzw. aus Lehmsand über tiefem Sand (Tab. 6.1) und nehmen zusammen mit ca.



**Abb. 6.8: Prozentuale Häufigkeiten der ermittelten Signaturen für den Versuchsschlag Rabenberg**



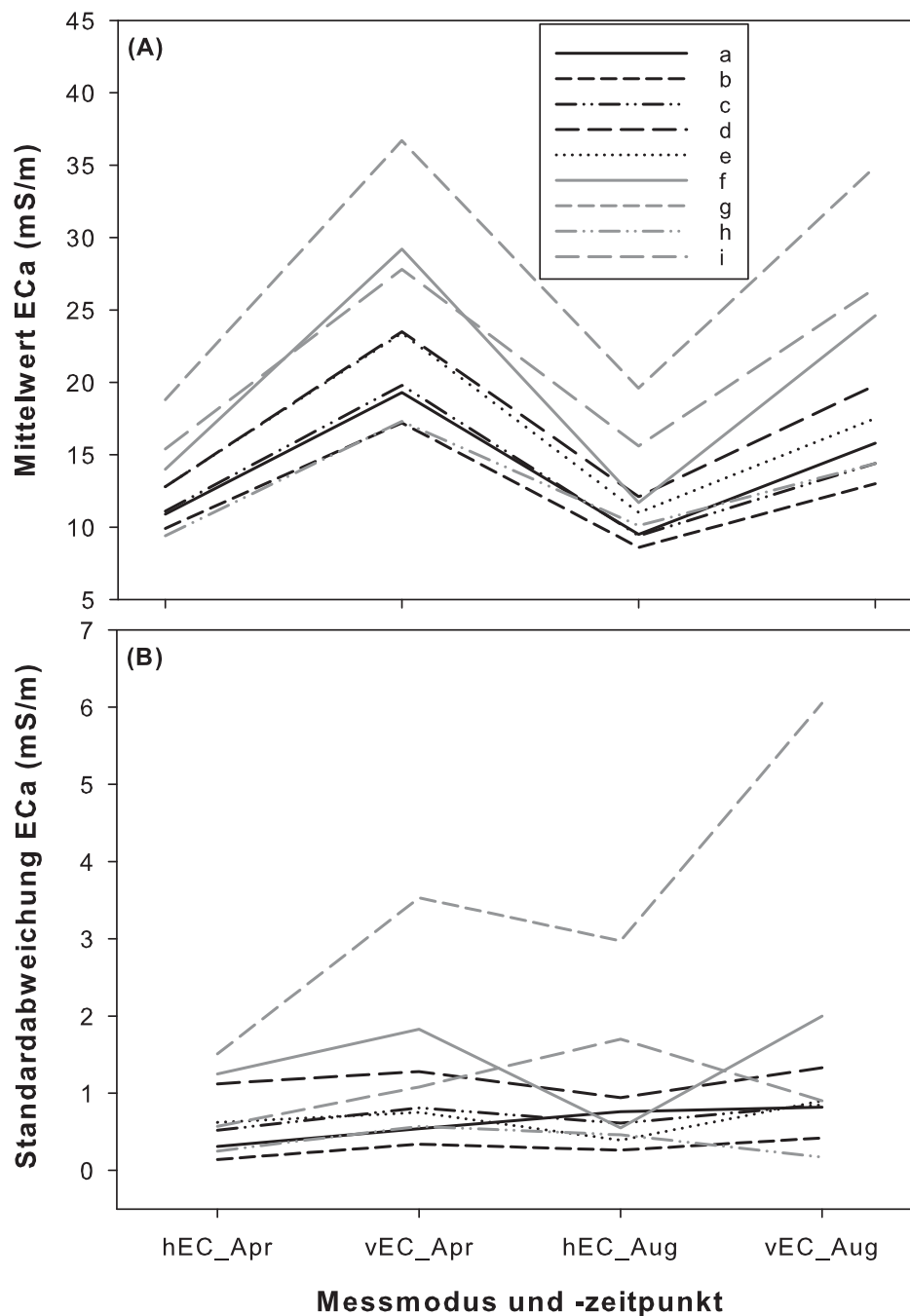
**Abb. 6.9: Flächenanteile (ha) der ermittelten Signaturen für den Versuchsschlag Rabenberg**

27 % (2.1 ha) gut ein weiteres Viertel der Gesamtfläche ein (Abb. 6.8 und Abb. 6.9). Sie treten über den gesamten nördlichen Teil des Schlags verteilt auf (Abb. 6.7). Im südwestlichen Viertel treten mit 14 % (1.13 ha) vorwiegend feuchte Pseudogleye aus Lehmtun auf, die durch die Signatur g beschrieben werden (Tab. 6.1 und Abb. 6.7 - Abb. 6.9). Außerdem kommen in diesem Teil des Schlags auch feuchte Gley-Pseudogleye aus Sand oder Lehmsand über tiefem Schluffton bzw. aus Lehmsand über Tonlehm vor, die durch die

Signaturen *f* und *i* repräsentiert werden (Tab. 6.1 und Abb. 6.7). Die drei Signaturen *f*, *g* und *i* nehmen zusammen mit ca. 20 % (1.5 ha) nahezu das gesamte südliche Viertel des Schlages ein (Abb. 6.7 - Abb. 6.9). Signatur *e* repräsentiert frische Kolluvisol-Pseudogleye aus Sand oder Lehmsand (Tab. 6.1). Diese durch erosionsbedingten Bodenauftrag geprägten Pseudogleye kommen im zentralen Teil des Schlages vor, der in einem Rinnenbereich unterhalb eines Abschnittes mit verstärkter Hangneigung (ca. 3.7 %) liegt (Abb. 6.4 und Abb. 6.7), insgesamt aber nur 3.6 % (0.3 ha) der Schlagfläche einnimmt (Abb. 6.8 und Abb. 6.9). Insgesamt werden ca. 95 % der gesamten Schlagfläche im Modell den Signaturen *a* bis *i* zugeordnet. Die restlichen 5 % (0.4 ha) entfallen auf Mischsignaturen, die aufgrund ihrer Leitfähigkeitsmuster keinem der vorgegebenen Trainingsareale eindeutig zugeordnet werden konnten. Hierbei nehmen die Mischsignaturen *ad* und *ac* mit zusammen 3 % bzw. 0.24 ha mehr als die Hälfte der verbleibenden Fläche ein (Abb. 6.8 und Abb. 6.9).

Zur Beurteilung der festgelegten Trainingsareale *a* bis *i* wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen der ECa-Werte aus den vier unterschiedlichen Messungen für das jeweilige Trainingsareal ermittelt und die entstandenen Kurven miteinander verglichen (Abb. 6.10). Aus Abb. 6.10 A ist ersichtlich, dass sich einige der Trainingsareale bezüglich ihrer Mittelwerte sehr ähnlich sind und dass die Differenzen zwischen den Mittelwerten meist unter 5 mS/m liegen. Betroffen sind insbesondere die Areale *a* und *c*, die frische Pseudogleye aus sandigen Substraten darstellen sowie die Areale *b* und *h*, die trockene Pseudogleye aus sandigen Substraten repräsentieren (vgl. Tab. 6.1). Dies wirft zunächst die Frage auf, ob die Areale korrekt gewählt wurden oder ob sie sich für eine Ermittlung unterschiedlicher Bodenzonen auf dem Versuchsschlag zu ähnlich sind. Bezüglich der Wasserstufe bestehen zwar keine Unterschiede zwischen den beiden genannten Arealpaaren, betreffend der Textur bzw. deren Schichtung treten jedoch Differenzen auf (Tab. 6.1). Durch das Trainingsareal *a* z. B. werden Böden aus Sand und Lehmsand beschrieben, Areal *c* beschreibt Böden aus Lehmsand über tiefem Sand. Da die Leitfähigkeit ein integriertes Mischsignal über die Erfassungstiefe ist, können Unterschiede in der Schichtung der Texturen zu ähnlichen oder gleichen ECa-Werten führen. Ebenso verhält es sich mit dem Wassergehalt des Bodens: unterschiedliche Gehalte über die Tiefe des Bodenprofils können zu ähnlichen oder gleichen Leitfähigkeitswerten führen. Aufgrund ihrer Unterschiede in der Textur und Schichtung, die für eine Differenzierung von verschiedenen Bodenzonen auf dem Schlag von großer Bedeutung sind, wurden die Areale *a* und *c* sowie *b* und *h* daher trotz ähnlicher Mittelwerte gesondert ausgewiesen. Hierdurch lässt sich auch der relativ hohe Anteil der Mischsignatur *ac* erklären. Die übrigen Areale *d*, *e*, *f*, *g* und *i* unterscheiden sich bezüglich ihrer Mittelwerte





**Abb. 6.10: Mittelwerte (A) und Standardabweichungen (B) der ECa-Werte aller vier Messungen für die Trainingsareale *a* – *i***

wesentlich deutlicher (Abb. 6.10 A). Die Differenz ihrer Mittelwerte liegt meist bei mindestens 5 mS/m, was ein deutlicher Hinweis auf hinreichende Unterschiede zwischen den Arealen ist und die Entscheidung für ihre gesonderte Ausweisung unterstützt.

Zur Modellanwendung gehört immer auch die Validation, die üblicherweise über den Vergleich der Simulationsergebnisse mit neu erhobenen Felddaten erfolgt. In diesem Falle wurden zur Validation die insgesamt 11 Bohrpunkte aus den Projekten *preagro I* und *II*

**Tab. 6.4: Übereinstimmung der Modellergebnisse mit Ergebnissen von Feldaufnahmen**

Bohrungen aus Projekt	Bohrpunkt (Nr.)	Simulationsergebnis (Bodentyp + <i>BA-Gruppe</i> )	Signatur	Felddaufnahme (Bodentyp + <i>BA-Gruppe</i> )	Übereinstimmung (*)
preagro I	1	SS aus lt	g	SS aus lt	+++
	2	SS aus lt	g	BB-SS aus ls//lt	+
	3	SS aus ls//s	c	BB-SS aus ls	++
	4	SS aus lt	g	YK-SS aus ss/lt	+
	5	SS aus lt	g	GG-SS aus ls//tl	+
	6	SS aus ss oder ls	a	YK-SS aus ls/ss	++
	8	SS aus ss oder ls//sl	d	SS aus ll/sl	++
	10	SS aus ls//ss	c	YK-SS aus ls/ss	++
	12	SS aus ss oder ls	a	SS aus ls\ss	+++
preagro II	4	SS aus ss oder ls	a	BB-SS aus ls	++
	6	YK-SS aus ss oder ls	e	BB-SS aus ls	++

(\*) sehr gute (+++), gute (++), mäßige (+), keine (-) Übereinstimmung

verwendet, die nicht in die Festlegung der Trainingsareale eingeflossen sind. Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen ECa-Werten und Bodeneigenschaften, wie z. B. Bodenfeuchte und Tongehalt (DURLESSER 1999; FRIEDMAN 2005; KING U. A. 2003; MCNEILL 1980), schien diese Variante der Validierung gerechtfertigt. Aus Tab. 6.4 können die Ergebnisse des Vergleichs entnommen werden. In drei Fällen (27%) wurde nur mäßige Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen festgestellt. Das heißt, es traten sowohl bezüglich des Bodentyps als auch der Bodenartengruppe Abweichungen zu den Felddaten auf, die jedoch noch als verhältnismäßig übereinstimmend angesehen werden konnten (vgl. Tab. 6.4, Bohrpunkte 2, 4 und 5 aus dem Projekt *preagro II*). In 6 von 11 Fällen (55 %) wurde eine gute, in 2 Fällen (18 %) eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Felddaten festgestellt. In diesen Fällen wurden nur leichte Abweichungen bezüglich der Bodenartengruppe bzw. deren Abfolge oder des Bodentyps bzw. der Tiefe der Pseudovergleyung festgestellt. In 73 % der Fälle kann also von guter bis sehr guter Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Felddaten gesprochen werden. Bemerkenswert ist, dass in keinem Fall überhaupt keine Übereinstimmung festgestellt werden konnte, was eventuell auch auf die geringe Vielfalt an vorkommenden Bodentypen auf dem Schlag zurückgeführt werden kann. Der Flächenanteil der Mischsignaturen, deren Ermittlung als ein Vorteil des vorgeschlagenen Modells gesehen wird (vgl. DOBERS, STUCZYNSKI 2005), ist geringer als erwartet. Gründe dafür, dass das Modell nur einen geringen Anteil an Mischsignaturen ausweist, wird zum einen die relativ hohe Anzahl an Trainingsarealen und zum anderen die klare Strukturierung der Region Groß Twülpstedt bezüglich der auftretenden Texturen sein. Aufgrund der Prägung durch die von Tonen unterlagerten glazialen,

überwiegend sandigen Deckschichten sind die Unterschiede in der vertikalen Abfolge der Texturen und deren Übergänge meist sehr deutlich, was die vorwiegende Zuordnung der einzelnen Pixel zu den definierten Trainingsarealen verursacht.

Die manuelle Digitalisierung der Trainingsareale und die Festlegung der *a priori*-Wahrscheinlichkeiten sind subjektive Prozesse, die mit großer Sorgfalt durchgeführt werden müssen, da diese das Modellergebnis deutlich beeinflussen. Über solche semiquantitativen Methoden besteht jedoch die Möglichkeit, deduktives Expertenwissen als Steuerungsfunktion in das Modell einfließen zu lassen. Dies ist gerade im Zusammenhang mit der Modellierung von Bodenkarten interessant, da Bodeneigenschaften und -funktionen durch ein hohes Maß an Heterogenität und Kontinuität sowie durch unscharfe Grenzen und fließende Übergänge geprägt sind. Von enormer Bedeutung ist dieses *a priori*-Wissen, wenn nur wenige beprobte Areale im Feld vorliegen, da für die direkte Interpolation eine hohe Anzahl von Beprobungen mit entsprechenden Probenahmedistanzen nötig ist (vgl. FROGBROOCK U. A. 1999; HERBST, LAMP 2004; MCBRATNEY, PRINGLE 1997; VIERA 1999).

Unter der Bedingung, dass entsprechendes und ausreichendes Expertenwissen vorliegt, liefert das vorgeschlagene Modell auf Basis der Dempster-Shafer-Theorie bezüglich Bodentyp und Wasserstatus sowie der Bodenartengruppen und deren Abfolge gute Ergebnisse für den Versuchsschlag Rabenberg und kann dazu beitragen, den Aufwand zu verringern, der mit der Erfassung von Daten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung einhergeht. Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit ist aufgrund der oben beschriebenen Zusammenhänge zwischen Bodeneigenschaften und Leitfähigkeit für die Bodenregion, in der der Versuchsschlag liegt, gut als Eingangsdatum zu nutzen. Dies ist jedoch nicht für alle Landschaften der Fall. Für den zweiten Versuchsschlag bei Wulfen konnte das Modell unter Verwendung von Leitfähigkeitsdaten keine guten Ergebnisse erzielen. In diesen Landschaften sind andere Daten, wie z.B. Luftbilder oder digitale Höhenmodelle, aber auch Leitfähigkeitsdaten in Ergänzung mit weiteren Daten für hinreichend genaue Simulationsergebnisse nötig. Welche Eingangsdaten sich am besten eignen, muss für die jeweilige Region von Interesse geprüft werden.



## **7 Allgemeine Diskussion**



Die Effizienz der Nutzung von variabel verfügbaren Bodenressourcen durch das Wurzelsystem spielt eine große Rolle bei der Festlegung des Ertrages von Nutzpflanzen (ANDREN, HANSSON, VEGH 1993). Die Rate, mit der Wasser und Nährstoffe für Wachstum und Ertragsbildung genutzt werden, wird erheblich durch das Wurzelwachstum bedingt (LAMBERS, CHAPIN, PONS 2008). Kulturpflanzen unterscheiden sich in ihren Wurzeleigenschaften, die von der Heredität abhängen, aber maßgeblich durch äußere Umweltfaktoren verändert werden (KRAMER, BOYER 1995). Hierzu gehören neben Managementmaßnahmen, wie Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Düngung, auch natürliche Faktoren, die in erster Linie durch hoch variable standörtliche Eigenschaften bedingt sind. Zu diesen Standorteigenschaften zählen z. B. Textur, Tiefe, Wassergehalt, Mineralogie, Chemie und Belüftung des Bodens und auch die Konzentration an gelösten Stoffen (vgl. KRAMER, BOYER 1995). Die Aufnahme von gelösten Stoffen und Wasser wird durch das Aufnahmevermögen der Pflanzen bestimmt, das wesentlich von den morphologischen, anatomischen und physiologischen Eigenschaften der Wurzeln beeinflusst wird (BULJOVICIC, ENGELS 2001). Eine morphologische Eigenschaft von herausragender Bedeutung ist die Wurzellängendichte, die Rückschlüsse über die Leistungsfähigkeit des Wurzelsystems hinsichtlich seiner Versorgungsfunktion für die Gesamtpflanze geben kann (DANNOWSKI, WERNER 1997). So können Pflanzen mit einer hohen Wurzellängendichte Wasser und Nährstoffe im Boden besser erschließen als Pflanzen mit niedriger Wurzellängendichte (CLAASSEN, STEINGROBE 1999). Die Aufnahmerate wird unter anderem von Wasser- und Nährstoffverfügbarkeiten festgelegt, die durch verschiedene bodenphysikalische Bedingungen beeinflusst werden (vgl. KLEPPER 1992). Da die Feuchte des Bodens großen Einfluss auf dessen Temperatur und Durchdringungswiderstand hat, spielt der Bodenwasserstatus für das ober- und unterirdische Pflanzenwachstum sowie für die Ertragsbildung eine entscheidende Rolle.

Die beiden Versuchsschläge Rabenberg in Groß Twülpstedt und Finkenherd in Wulfen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihrer Geogenese und Pedogenese. Aufgrund dieser unterschiedlichen Bodenbedingungen bestehen auf den beiden Schlägen unter anderem gravierende Unterschiede bezüglich der Bodendichte und der Wasserverhältnisse. Die Bodendichten sind am Standort Rabenberg generell höher (Tab. 4.1). Weiterhin sind die dort vorkommenden Böden im Gegensatz zu denjenigen des Finkenherds durch Staunässe beeinflusst. Dichte und Wassergehalt des Bodens haben starken Einfluss auf dessen Durchdringungswiderstand, der wiederum sowohl das Wurzel- als auch das Sprosswachstum sehr stark beeinflusst (PASSIOURA 2002) und ein wichtiger Stressfaktor bezüglich der pflanzlichen

Produktivität ist (WHALLEY U. A. 2008). Dies führte zu der Frage, wie sich diese unterschiedlichen Standort- und damit auch unterschiedlichen Wachstumsbedingungen in der Durchwurzelung der beiden Versuchsschläge bemerkbar machen. Hieraus wurde die Hypothese abgeleitet, dass die in der Literatur berichteten Ergebnisse über die Einflüsse verschiedener Standortbedingungen auf die Durchwurzelung unter Weizen auf die beiden Versuchsstandorte zutreffen. In der Literatur wird berichtet, dass sich neben Textur, Tiefe, Mineralogie, Chemie und Belüftung des Bodens sowie Konzentration an gelösten Stoffen (KRAMER, BOYER 1995 ) besonders der Wasserstatus und die Bodendichte bzw. der Durchdringungswiderstand auf die Durchwurzelung auswirken (vgl. KLEPPER 1992, PASSIOURA 2002). So kann beispielsweise Wasserstress in Form von kurzzeitigem Wasserdefizit zu einer Stagnation des Wurzelwachstums mit direkten Konsequenzen für Sprosswachstum und Ertrag führen (KLIMANEK 1987) und anhaltend niedrige Wasserversorgung das Wurzelwachstum in tiefere Bodenschichten fördern (SCHROETTER, ROGASIK, SCHNUG 2006). In Bezug auf den Bodenwasserstatus spielt Staunässe eine große Rolle für das Wurzel- und auch Pflanzenwachstum, da diese sowohl das Wurzelwachstum und dessen Wachstumsrate als auch die Wurzelpenetration deutlich mindert, die Durchwurzelung der oberflächennahen Schichten aber verstärken kann (CANNELL U. A. 1980; CANNELL U. A. 1985; MALIK U. A. 2002; WATSON, LAPINS, BARRON 1976). Die unterschiedlichen Bedingungen an den beiden Versuchsstandorten müssten sich demnach insofern in einer unterschiedlichen Durchwurzelung widerspiegeln, als dass am Standort Rabenberg eine geringere Durchwurzelung des Unterbodens und evtl. eine höhere Durchwurzelung des Oberbodens auftreten müsste. Da die Monitoringpunkte der Versuchsschläge beispielhaft für typische Böden sowie Standortbedingungen und deren Variabilität auf den Schlägen bzw. in den jeweiligen Regionen sind, müsste diese Annahme auch auf die Unterschiede in der Durchwurzelung zwischen den Monitoringpunkten zutreffen. Tatsächlich wurde beim Vergleich der Wurzelanteile in Ober- (0 - 30 cm) und Unterboden (30 - 120 cm) und der Wurzellängendichten in unterschiedlichen Bodentiefen auf den beiden Schlägen festgestellt, dass die Durchwurzelung im Unterboden in beiden Untersuchungsjahren am Standort Rabenberg im Vergleich zum Standort Finkenherd wesentlich geringer war. Dort lagen 65 - 96 % der gemessenen Wurzellängendichten im Oberboden und 4 - 35 % im Unterboden vor. Am Standort Wulfen traten dagegen nur 47 - 71 % der Wurzellängendichten im Oberboden und immerhin 29 - 57 % im Unterboden auf (Tab. 4.5). Diese Verhältnisse werden auch in unterschiedlich stark ausgeprägten Tiefengradienten der Durchwurzelung deutlich, die für den Rabenberg wesentlich höher sind



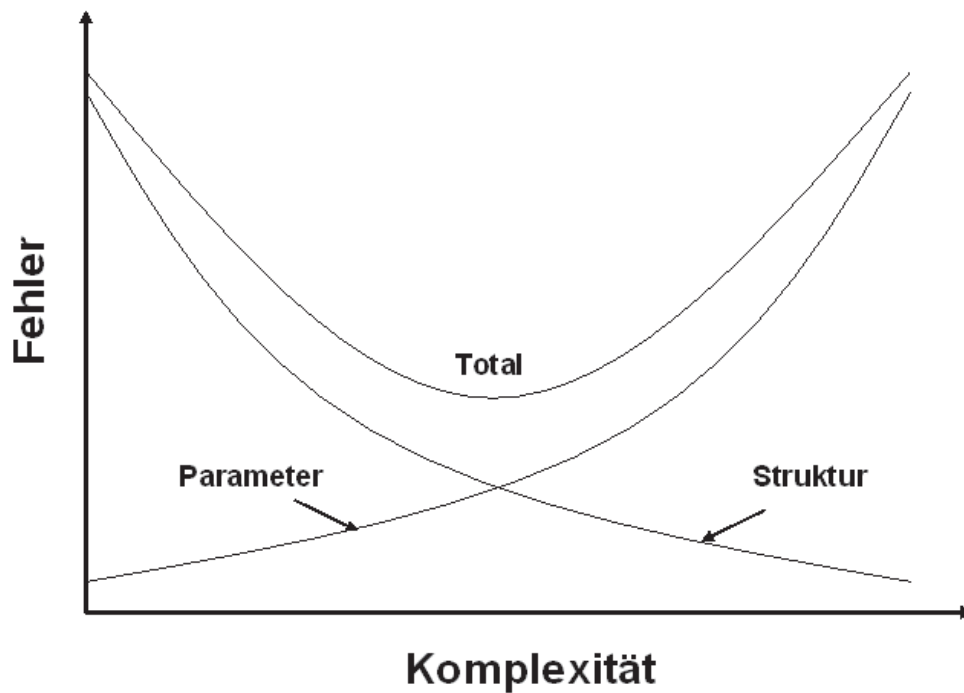
als für den Finkenherd (Abb. 4.15 und Abb. 4.16). Auch die Unterschiede zwischen den einzelnen Monitoringpunkten der Versuchsschläge bezüglich der Ober- und Unterbodendurchwurzelung bzw. der mittleren Wurzellängendichte an den Messpunkten lassen sich mit den in der Literatur gefundenen Aussagen über den Einfluss des Wasserstatus' und der Bodendichte bzw. des Durchdringungswiderstandes erklären.

In Bezug auf die Anwendung des CERES-Modells zur Optimierung des Bestandesmanagements und dessen Anpassung an die standörtlich und zeitlich variablen Bedingungen, stellte sich die Frage, ob die Berechnungsgenauigkeit der Modelle für eine ausreichende Abbildung dieser Variabilität hoch genug ist, so dass die Voraussetzung einer hohen Vorhersagequalität erfüllt wird und das Potenzial des Modells als Vorhersage- und Entscheidungsinstrument adäquat ausgeschöpft werden kann. Daraus wurde in dieser Arbeit die Hypothese abgeleitet, dass die standörtliche und zeitliche Variabilität von Wurzelwachstum und Bodenwasser mit dem im Rahmen dieser Arbeit genutzten Modell CERES-Wheat aus präzisionslandwirtschaftlicher Sicht ausreichend abgebildet werden kann. Nach Validation der Wurzellängendichten- und Bodenwassergehaltsberechnungen des Modells für die beiden Versuchsschläge musste diese Hypothese jedoch abgelehnt werden. Neben einer gravierenden Unterschätzung der Wurzellängendichten um insgesamt 25 - 35 %, in den oberen 30 cm des Bodens sogar um 45 - 50 % (Abb. 5.1 - Abb. 5.7), wurde kaum Variabilität zwischen den verschiedenen Monitoringpunkten simuliert (Tab. 5.1 und Tab. 5.2, Abb. 5.10 und Abb. 5.11). Zwar wurde der Bodenwassergehalt mit einer höheren standörtlichen Schwankung abgebildet als die Wurzellängendichte, die tatsächliche Variabilität wurde, insbesondere für den Schlag Finkenherd, jedoch nicht widerspiegelt (Abb. 5.10 und Abb. 5.11). Unterhalb von Wassergehalten im Bereich der Feldkapazität wurde der Bodenwassergehalt von CERES-Wheat tendenziell überschätzt und oberhalb dieses Bereiches tendenziell unterschätzt (Abb. 5.8 und Abb. 5.9). Auch die zeitliche Variabilität von Wurzellängendichte und Bodenwassergehalt konnte nach Auswertung der Modellergebnisse nicht als ausreichend eingestuft werden (Tab. 5.1 - Tab. 5.5, Abb. 5.10 - Abb. 5.14). Die beschriebenen Ergebnisse entsprechen bzw. sind vergleichbar mit unterschiedlichen Ergebnissen, die in der Literatur bezüglich der Wurzellängendichten- und Bodenwassergehaltskalkulation von CERES zu finden sind. So stellten z. B. SAVIN, HALL, SATORRE 1994 eine deutliche Unterschätzung der Wurzellängendichte durch CERES in den oberen 10 cm des Bodens fest und ROBERTSON U. A. 1993 berichten für manche ihrer Datensets von einer Unterschätzung der oberflächennahen Wurzellängendichten, die teilweise mehr als 20 % betrug. DE FARIA, BOWEN 2003 fanden, dass das Bodenwassermodul von DSSAT bei Wassergehalten unterhalb der Feldkapazität die

Wasserversickerungsrate in den unteren Bodenschichten unterschätzte, was dazu führte, dass der simulierte Bodenwassergehalt nahe Gehalten bei Feldkapazität konstant war.

Auch für oberirdische Variablen wie Biomasse und Ertrag scheint das Modell unter den getesteten Umweltbedingungen für teilflächenspezifische bzw. präzisionslandwirtschaftliche Belange nicht geeignet zu sein (pers. Mitteilg. J. Bobert, 2009). Da diese Diskrepanzen nicht über die Kalibrierung behoben werden konnten, sind also offenbar Änderungen in der Modellstruktur bzw. die Einbindung von anderen Routinen oder Modellen in die Struktur nötig, damit das CERES-Modell in diesem Zusammenhang unter den getesteten Bedingungen genutzt werden kann. Von einer unzureichenden Qualität der Bodenwassergehaltsberechnung aufgrund von Unzulänglichkeiten der Methoden, mit denen beispielsweise der Bodenwasserfluss und die Wurzelwasseraufnahme im Modell berechnet werden, wird in diversen Studien berichtet. Das Bodenwassermodul in DSSAT (RITCHIE 1998) beinhaltet ein auf der Richardsgleichung basierendes, eindimensionales Modell. Wassergehaltsänderungen in den Bodenschichten werden unter Berücksichtigung von Niederschlag, vertikaler Drainage, Wasserbewegung im ungesättigten Bereich, Evaporation und Wasseraufnahme durch die Pflanzenwurzeln berechnet. Die Abwärtsbewegung von Bodenwasser wird über einen wassergehaltsgetriebenen Ansatz berechnet („tipping bucket“). Das bedeutet, dass abwärtsgerichteter Wasserfluss aus einer Bodenschicht nur dann stattfindet, wenn der Bodenwassergehalt in einer Schicht zwischen Sättigung und nutzbarer Feldkapazität liegt. (EITZINGER U. A. 2004) und (JAMIESON U. A. 1998) berichten beispielsweise von einer Überschätzung der Wasseraufnahme durch Wurzeln sowie der Durchwurzelungstiefe (vgl. SAVIN, HALL, SATORRE 1994), die zu einer Überschätzung der Bodenwasserentleerung beiträgt. Des Weiteren konnten (GABRIELLE, MENASSERI, HOUOT 1995) nach einer Implementierung der Darcy-Gleichung in die Abschnitte des Modells, in denen Versickerung und kapillarer Aufstieg berechnet werden, bessere Ergebnisse erzielen, als mit dem ursprünglichen Bodenwassermodul (vgl. auch DE FARIA, BOWEN 2003).

Eine weitere Möglichkeit der Modelloptimierung besteht in der rekursiven Modellierung. Bei diesem Verfahren werden die Parameter im Modell - im Falle von CERES die genetischen Koeffizienten - über den wiederholten Vergleich von Ergebnissen der *a priori*- und *a posteriori*-Modellierung angepasst. Des Weiteren ist der Quellcode zwar für Nutzer der DSSAT-Modelle zugänglich, aber nicht ausreichend dokumentiert, um relativ einfach Änderungen in der Modellstruktur vornehmen zu können. Das macht Änderungen sowohl äußerst zeitaufwendig als auch schwierig, so dass sie nur von Spezialisten, wie z. B. den Modellentwicklern, durchgeführt werden können. Für eine praktische Anwendung sollte ein



**Abb. 7.1: Theoretische Komponenten des Vorhersagefehlers in Modellen mit steigender Komplexität bei bekannter Struktur des zu modellierenden Systems (PASSIOURA 1996)**

Modell so gestaltet sein, dass Nutzer diese aufwendigen Änderungen nicht durchführen müssen. Dafür muss es allerdings möglichst robust hinsichtlich der Fehleranfälligkeit sein, die von Komplexität und Parameteranzahl des Modells abhängt.

Generell muss unterschieden werden, ob ein Modell im wissenschaftlichen oder im praxisbezogenen Kontext angewandt werden soll, da sich dementsprechend zwei unterschiedliche Herausforderungen ergeben: im wissenschaftlichen Kontext nämlich, Abläufe, Zusammenhänge und Funktionen von natürlichen Prozessen zu entschlüsseln (mechanistische Modelle), im praxisbezogenen Kontext, das bestehende Wissen zu nutzen, um z. B. das Management von landwirtschaftlichen Betrieben zu verbessern (funktionale Modelle) (vgl. PASSIOURA 1996). Eine hohe Komplexität bezüglich ihrer Struktur und der enthaltenen Parameter ist bei wissenschaftlich angewandten Modellen daher durchaus sinnvoll und gerechtfertigt, wobei berücksichtigt werden muss, dass sich die Komplexität eines Modells auf dessen Fehler bzw. Berechnungsgenauigkeit auswirkt. Dieser Fehler kann in zwei Komponenten geteilt werden, wobei die eine Fehlerkomponente aus der Parameterschätzung und die andere aus einem systematischen Fehler bzw. einer fehlerhaften Struktur aufgrund einer Übereinfachung resultiert (REYNOLDS, ACOCK 1985). Dabei steigt der kumulative Fehler der Parameter mit deren Anzahl, die mit der steigenden Komplexität des Modells zusammenhängt, während der systematische Fehler mit steigender Modellkomplexität sinkt (Abb. 7.1).

Nach (PASSIOURA 1996) sollten landwirtschaftliche Simulationsmodelle, also praktisch angewandte Modelle, so einfach wie möglich sein, einen geringen Datenbedarf haben und auf einfachen und robusten empirischen Beziehungen zwischen den Hauptvariablen bestehen, wenn die zu quantifizierenden Mechanismen nicht eindeutig verstanden werden. Vor allem die Voraussetzung des geringen Datenbedarfs kann im Rahmen der für die vorliegende Arbeit durchgeführten Modellrechnungen - besonders unter Berücksichtigung von deren Qualität - nicht als gegeben angesehen werden. Eine mögliche Ursache für die nicht zufrieden stellende Qualität der Modellergebnisse können fehlerhafte Eingangsdaten sein. Im vorliegenden Fall müssen die aus der MARS-Datenbasis des Joint Research Centre der Europäischen Kommission (JRC) stammenden regionalisierten Wetterdaten kritisch betrachtet werden. Da diese Daten auf interpolierten Werten verschiedener Wetterstationen der entsprechenden Region basieren und da Klimadaten generell starken kleinräumigen Schwankungen unterliegen, stellen sie zwangsläufig eine Unsicherheit bezüglich der Simulationen dar. Es stellte sich daher die Frage, wie sich Fehler bzw. Unsicherheiten in den Klimadaten auf die Modellsimulationen auswirken. Daraus wurde die Hypothese abgeleitet, dass Änderungen in den Niederschlagsmengen einen deutlichen Effekt auf die Simulationen von Bodenwassergehalt und Wurzellängendichte sowie deren Fehler haben. Aus diesem Grund wurde eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt, indem die Niederschlagsmenge stufenweise (jeweils immer um 10 %) von -70 bis +130 % herauf- bzw. herabgesetzt wurde. Da nach Auswertung der Ergebnisse jedoch nur ein marginaler Einfluss einer Änderung der Niederschlagsmenge auf die beiden Variablen und deren Fehler zu erkennen war, musste die Hypothese abgelehnt werden. RMSE, Bias und Varianz der kalkulierten Wurzellängendichten änderten sich in den meisten Fällen kaum oder nur äußerst geringfügig (Tab. 5.7). Im Vergleich dazu war die Sensitivität der Bodenwassergehaltssimulationen auf eine Änderung der Niederschlagsmengen zwar höher aber nicht so hoch wie erwartet. RMSE, Varianz und Bias schwankten auch für diese Variable in relativ geringfügigen Bereichen (Tab. 5.6). Die Spannweiten für den RMSE der simulierten Bodenwassergehalte bewegten sich zwischen 0.9 und 1.9 Vol%, für die Wurzellängendichten zwischen 0.01 und 0.11 cm cm<sup>3</sup>. Bei einer Änderung der Niederschlagsmengen um bis zu -30 bzw. +30 % wäre jedoch eine wesentlich größere Sensitivität der Simulationsergebnisse zu erwarten gewesen.

Neben der Qualität der Anpassung von Bewirtschaftungsmaßnahmen an die Variabilität von Boden und Pflanzenbeständen hängt auch die Qualität der Ergebnisse von Pflanzenwachstums- und Ertragssimulationsmodellen von den bereitgestellten Daten ab (vgl. HUNT, BOOTE 1998). Mit steigender Auflösung und Qualität der Inputdaten besteht die Möglichkeit,

die Genauigkeit der Erfassung existierender Heterogenitäten von Boden und Pflanzenbeständen zu erhöhen. Bewirtschaftungsmaßnahmen können so potenziell besser an diese Variabilität angepasst bzw. Simulationsergebnisse eines Modells potenziell besser an die Realität angenähert werden. Für die Erfassung dieser Daten in der nötigen räumlichen und zeitlichen Auflösung sind jedoch Probenahmedistanzen erforderlich, die in der Regel mit einem hohen zeitlichen, finanziellen und auch personellen Aufwand einhergehen (vgl. FROGBROOCK U. A. 1999; HERBST, LAMP 2004; MCBRATNEY, PRINGLE 1997; VIERA 1999). Es stellte sich die Frage, wie diese nicht-metrischen und komplexen Bodeninformationen unter relativ geringem Aufwand hoch aufgelöst verfügbar gemacht werden können. Daraus wurde die Hypothese abgeleitet, dass dies mit einem Klassifizierungsmodell auf Basis der Dempster-Shafer-Theorie möglich ist. Ein großer Vorteil dieser Theorie im Vergleich zu anderen Methoden liegt in der Möglichkeit, *a priori*-Wissen in den Klassifizierungsprozess einfließen lassen zu können. Durch solche semiquantitativen Methoden wird es möglich, die Unsicherheit bei der Klassifizierung besser auszudrücken und damit die Berechnungsgenauigkeiten von Modellen zu erhöhen (LEIN 2003).

Da Messungen der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeiten eine Möglichkeit zur Identifizierung von bodenphysikalischen und -chemischen Eigenschaften und somit zur Identifizierung der räumlichen Bodenheterogenität bieten (CORWIN, LESCH 2005b; CORWIN, LESCH 2005a), wurde das Modell unter Nutzung von multitemporal und multimodal erfassten Leitfähigkeitsdaten sowie Informationen zu Textur, Bodentyp und Wasserstatus ausgewählter Monitoringpunkte des Versuchsschlages Rabenberg entwickelt. Nach Auswertung der Modellergebnisse kann aufgrund der vorliegenden Feldstudien bestätigt werden, dass das vorgeschlagene Modell für den Versuchsschlag Rabenberg gute Ergebnisse bezüglich Bodentyp und Wasserstatus sowie der Bodenartengruppen und deren Abfolge liefert (Tab. 6.4).

Die Leitfähigkeit hängt unter gemäßigten humiden Bedingungen hauptsächlich von der Bodenfeuchte und dem Tongehalt ab. Hauptleiter für Strom im Boden sind die negativ geladenen Tonkolloidoberflächen und die Sternschichten (HERBST, LAMP 2006). Die Komplexität von Leitfähigkeitsmustern ist abhängig von der Variabilität der Textur, des Verlaufs der Texturänderungen im Feld (weich und sukzessive oder deutlich und plötzlich) und der Korrelation zwischen Textur und Wassergehalt (CORWIN, LESCH 2005b). Aufgrund der Zusammenhänge zwischen Leitfähigkeit und Ton- sowie Bodenwassergehalt sind die Daten der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit bezüglich der Bodenregion Groß Twülpstedt gut als Eingangsdaten für das vorgeschlagene Modell zu nutzen. Die Region weist aufgrund

ihrer Prägung durch die von Tonen unterlagerten glazialen, meist sandigen Deckschichten eine klare Strukturierung bezüglich der auftretenden Texturen auf, da die Unterschiede in der vertikalen Abfolge der Textur und deren Übergänge meist sehr deutlich sind. Dies trifft nicht auf alle Landschaften bzw. Bodenregionen zu. Für den zweiten Versuchsschlag bei Wulfen erbrachte das Modell unter Verwendung von Leitfähigkeitsdaten keine guten Ergebnisse. Vor einer Anwendung des vorgestellten Modells muss daher geprüft werden, welche Eingangsdaten - z. B. Luftbilder, digitale Höhenmodelle oder Leitfähigkeitsdaten in Ergänzung mit weiteren Daten - sich für die entsprechende Region am besten eignen.

Für das Modell mussten zunächst Trainingsareale definiert werden, die manuell digitalisiert wurden (Abb. 6.2). Der Vorteil dieser manuellen Bestimmung liegt in der Möglichkeit, *a priori*-Wissen über die Versuchsfläche einfließen lassen zu können. Da für eine Schätzung von beprobten auf unbeprobte Areale eine hohe Anzahl von Beprobungen mit entsprechenden Probenahmedistanzen nötig ist (vgl. FROGBROOCK U. A. 1999; HERBST, LAMP 2004; MCBRATNEY, PRINGLE 1997; VIERA 1999), ist dies von enormer Bedeutung, wenn nur wenige beprobte Areale im Feld vorliegen. Die Implementierung von Expertenwissen ist ansonsten nur über die Festlegung der *a priori*-Wahrscheinlichkeiten möglich, über die eine inhaltliche Gewichtung der Trainingsareale vorgenommen wird (Tab. 6.3). Im vorliegenden Falle geschah dies, indem die Häufigkeit des Auftretens der Areale in der Fläche berücksichtigt wurde.

Das Modell ermittelte neben den Monosignaturen, die durch die Trainingsareale definiert wurden, auch Mischsignaturen, die aufgrund ihrer Leitfähigkeitsmuster keinem der vorgegebenen Trainingsareale eindeutig zugewiesen werden konnten. Gerade im Zusammenhang mit Böden, deren Eigenschaften durch ein hohes Maß an Heterogenität und Kontinuität sowie durch unscharfe Grenzen und fließende Übergänge geprägt sind, könnte durch die Abbildung solcher Übergangs- oder Mischsignaturen die Qualität von Modellergebnissen verbessert werden. Die Mischsignaturen, deren Flächenanteil mit 5 % unerwartet gering ist, traten daher wie erwartet in den Übergangsbereichen der Monosignaturen auf (Abb. 6.7). Der geringe Anteil an Monosignaturen ist auf die klare Strukturierung der Region Groß Twülpstedt hinsichtlich der auftretenden Texturen zurückzuführen. Aufgrund dieser deutlichen Strukturierung ist die Wahrscheinlichkeit sehr gering, dass nicht definierte Areale Kombinationen von Leitfähigkeitssignalen enthalten, die nicht den Trainingsarealen zugeordnet werden können. Unter der Bedingung, dass entsprechendes und ausreichendes Expertenwissen vorliegt, liefert das vorgeschlagene Modell auf Basis der Dempster-Shafer-

Theorie hinreichend genaue Ergebnisse und kann dazu beitragen, den Aufwand zu verringern, der mit der Erfassung von Daten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung einhergeht.

In Bezug auf die für diese Arbeit aufgestellten vier Hypothesen wurden zusammenfassend folgende Ergebnisse erzielt:

Die in der Literatur zu findenden Angaben über die Einflüsse verschiedener Standortbedingungen auf das Wurzelwachstum von Nutzpflanzen - insbesondere über die Effekte von Bodenwasserstatus, Bodendichte und Durchdringungswiderstand - lassen sich für die Versuchsstandorte Groß Twülpstedt und Wulfen generalisieren.

Mithilfe von Pflanzenwachstumsmodellen kann die Reaktion von Pflanzen auf die Variabilität von Standortbedingungen potenziell berechnet werden.

Das für diese Arbeit verwendete Modell CERES-Wheat bildete unter den getesteten Bedingungen weder die standörtliche und zeitliche Variabilität von Wurzelwachstum und Bodenwasser hinreichend genau ab, noch zeigte es eine angemessene Sensitivität dieser beiden Variablen auf Änderungen in den Niederschlagsmengen.

Die Ergebnisse von Pflanzenwachstums- und Bodenmodellen, aber auch die Anpassung von Bewirtschaftungsmaßnahmen an die Variabilität von Boden und Pflanzenbeständen, hängen von Qualität und Quantität der bereitgestellten Daten ab, deren Erhebung mit hohem Aufwand verbunden ist.

Mit einem Klassifizierungsmodell auf Basis der Dempster-Shafer-Theorie können nicht-metrische und komplexe Bodeninformationen unter relativ geringem zeitlichem, personellem und finanziellem Aufwand hoch aufgelöst dargestellt werden.





## **8 Schlussfolgerungen und Ausblick**



Informationen über das Wurzelwachstum im Allgemeinen und über die Wurzellängendichte im Speziellen ermöglichen Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Wurzelsystems hinsichtlich seiner Versorgungsfunktion für die Gesamtpflanze. Die Ausprägung des Wurzelsystems ist abhängig von zeitlich und räumlich hoch variablen Standorteigenschaften wie beispielsweise dem Wasserstatus und der Bodendichte bzw. dem Durchdringungswiderstand. Eine adäquate Abbildung dieser Variabilität ist Voraussetzung für eine hohe Vorhersagequalität von Pflanzenwachstumsmodellen, die potenziell als Vorhersage- und Entscheidungsinstrumente genutzt werden können. Eine Anwendung des im Rahmen dieser Arbeit genutzten Modells CERES-Wheat als ein solches Instrument kann unter den getesteten Bedingungen nicht empfohlen werden, da die Abbildung der räumlichen und zeitlichen Variabilität von Wurzellängendichten und Bodenwassergehalten sowie die Sensitivität dieser Variablen auf eine Änderungen der Niederschlagsmengen nicht ausreichend war. Diese Unstimmigkeiten ließen sich nicht durch die Kalibrierung des Modells beheben, so dass entweder Änderungen in der Modellstruktur oder aber die Einbindung von anderen Routinen oder Modellen bezüglich des Wurzelwachstums und des Bodenwasserflusses bzw. der -verteilung empfohlen werden. Änderungen in der Struktur des CERES-Modells sind jedoch sehr zeitaufwendig und können nur von Spezialisten vorgenommen werden, da der Quellcode zwar für den Nutzer zugänglich, aber nicht ausreichend dokumentiert ist. Diese aufwendigen Änderungen sollten nicht nötig sein, da es sich bei CERES-Wheat um ein Modell für die praktische Anwendung handelt, was letztlich eine gewisse Robustheit des Modells erwarten lässt. Praktisch angewandte Modelle sollten nicht nur bezüglich der Anwendung sondern ebenso bezüglich der enthaltenen empirischen Beziehungen zwischen den Hauptvariablen möglichst einfach und robust, also nicht zu komplex sein. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass sich die Komplexität eines Modells auf dessen Berechnungsgenauigkeit auswirkt, die sowohl durch eine Übereinfachung als auch eine Überkomplizierung beeinträchtigt werden kann.

Die Erfassung von Daten in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung, wie sie häufig für eine Managementanpassung aber auch für die Modellierung benötigt werden, ist nicht nur mit hohem zeitlichem sondern meist auch mit hohem personellem und finanziellem Aufwand verbunden. Der in dieser Arbeit vorgestellte methodische Vorschlag für ein Klassifizierungsmodell auf Basis der Dempster-Shafer-Theorie soll dazu beitragen, diesen Aufwand zu verringern. In das Modell wird *a priori*-Wissen in Form von deduktivem Expertenwissen einbezogen, was für eine Schätzung von beprobten auf unbeprobte Areale von enormer Bedeutung ist, wenn nur wenige beprobte Areale existieren. Die diesem Modellvorschlag

zugrunde liegende Methode zur Klassifizierung von räumlichen Eingangsdaten ist eine in Anlehnung an die Dempster-Shafer-Theorie angepasste Maximum-Likelihood-Methode, die das volle Potential der Theorie nur teilweise ausschöpft. Als Grundlage für weitergehende Untersuchungen wären umfangreiche Daten- und Wissensdatenbanken von großem Nutzen. Die Einrichtung bzw. Nutzung solcher Datenbanken wäre nicht nur für Praxisbetriebe, die präzisionslandwirtschaftlich arbeiten, von Nutzen, sondern generell bezüglich der Modellierung von Boden, Pflanzen oder Klima, sei es im wissenschaftlichen oder praktischen, anwendungsorientierten Bereich.

## Literatur

- Altermann 1995** ALTERMANN, M.: Überblick über die Böden des mitteldeutschen Raumes. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* (1995), Nr. 77, S. 27–29
- Andren, Hansson, Vegh 1993** ANDREN, O.; HANSSON, A. C.; VEGH, K.: Barley nutrient uptake, root growth and depth distribution in two soil types in a rhizotron with vertical and horizontal minirhizotrons. In: *Swedish Journal of Agricultural Research* (1993), Nr. 23, S. 115–126
- Asseng u. a. 1998** ASSENG, S.; RITCHIE, J. T.; SMUCKER, A. J. M.; ROBERTSON, M. J.: Root growth and water uptake during water deficit and recovering in wheat. In: *Plant and Soil* (1998), Nr. 201, S. 265–273
- Atwell, Kriedemann, Turnbull 1999** ATWELL, B.; KRIEDEMANN, P.; TURNBULL, C.: *Plants in action*. South Yarra, Australia: Macmillan Publishers, 1999
- Barraclough, Leigh 1984** BARRACLOUGH, P. B.; LEIGH, R. A.: The root growth and activity of winter wheat roots in the field: I. The effect of sowing date and soil type on root growth of high-yielding crops. In: *Journal of Agronomy and Crop Science* (1984), Nr. 106, S. 45–59
- Basso u. a. 2001** BASSO, B.; RITCHIE, J. T.; PIERCE, F. J.; BRAGA, R. P.; JONES, J. W.: Spatial validation of crop models for precision agriculture. In: *Agricultural Systems* (2001), Nr. 68, S. 97–112
- Bauhus, Messier 1999** BAUHUS, J.; MESSIER, C.: Evaluation of fine root length and diameter measurements obtained using RHIZO Image Analysis. In: *Agronomy Journal* (1999), Nr. 91, S. 142–147
- Behrens u. a. 2005** BEHRENS, T.; FÖRSTER, H.; SCHOLTEN, T.; STEINRÜCKEN, U.; SPIES, E. D.; GOLDSCHMITT, M.: Digital Soil Mapping using Artificial Neuronal Networks. In: *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* (2005), Nr. 168, S. 21–32
- Behrens, Scholten 2005** BEHRENS, T.; SCHOLTEN, T.: Soil attribute and spatial trends: A comparative study on algorithms and attributes. In: GRUNWALD, S. (Hrsg.): *Pedometrics 2005 : Frontiers in Pedometrics*. Biannual Meeting of Commission 1.5 Pedometrics: Book of abstracts. Naples, Florida, USA, 2005, S. 3
- Bengough u. a. 2000** BENGOUGH, A. G.; CASTRIGNANO, A.; PAGÈS, L.; VAN NOORDWIJK, M.: Sampling strategies, scaling and statistics. In: SMIT, A. L.; BENGOUGH, A. G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S. C. (Hrsg.): *Root Methods : A Handbook*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2000, S. 147–170
- Böhm 1978** BÖHM, W.: Untersuchung zur Wurzelentwicklung bei Weizen. In: *Zeitschrift für Acker- und Pflanzenbau* (1978), Nr. 147, S. 264–269
- Böhm 1979** BÖHM, W.: *Methods of studying Root Systems*. Berlin: Springer, 1979
- Bouma, Nielsen, Koustaal 2000** BOUMA, T.; NIELSEN, K.; KOUSTAAL, B.: Sample preparation and scanning protocol for computerized analysis of root length and diameter. In: *Plant and Soil* (2000), Nr. 218, S. 185–196
- Brevik, Fenton, Lazari 2006** BREVIK, E.; FENTON, T.; LAZARI, A.: Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. In: *Precision Agriculture* (2006), Nr. 7, S. 393–404

- Bronstein u. a. 1995** BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAJEW, K. A.; MUSIOL, G.; MÜHLIG, H.: *Taschenbuch der Mathematik*. 2. Aufl. Frankfurt a. M. : Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, 1995
- Buljovic, Engels 2001** BULJOVCIC, Z.; ENGELS, C.: *Nitrate uptake ability by maize roots during and after drought stress*. In: *Plant and Soil* (2001), Nr. 229, S. 125–135
- Cannell u. a. 1985** CANNELL, R.; BELFORD, R.; BLACKWELL, P.; GOVI, G.; THOMSON, R.: *Effects of waterlogging on soil aeration and on root and shoot growth and yield of winter oats (Avena sativa L.)*. In: *Plant and Soil* (1985), Nr. 85, S. 361–373
- Cannell u. a. 1980** CANNELL, R. Q.; BELFORD, R. K.; GALES, K.; DENNIS, C. W.; PREW, R. D.: *Effects of waterlogging at different stages of development on the growth and yield of winter wheat*. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* (1980), Nr. 31, S. 117–132
- Carroll, Oliver 2005** CARROLL, Z. L.; OLIVER, M. A.: *Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity*. In: *Geoderma* (2005), Nr. 128, S. 354–374
- Chaudhary, Bhatnagar 1980** CHAUDHARY, T. N.; BHATNAGAR, V. K.: *Wheat root distribution, soil water depletion and grain yield as influenced by time and rate of irrigation*. In: *Agricultural Water Management* (1980), Nr. 3, S. 115–124
- Claassen, Steingrobe 1999** CLAASSEN, N.; STEINGROBE, B.: Mechanistic simulation models for a better understanding of nutrient uptake from soil. In: RENGEL, Z. (Hrsg.): *Mineral nutrition of crops : Fundamental mechanisms and implications*. New York: Food Products Press, 1999. – ISBN 1560228806, S. 327–367
- Corwin, Lesch 2005a** CORWIN, D. L.; LESCH, S. M.: *Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: I. Survey protocols*. In: *Computers and Electronics in Agriculture* (2005), Nr. 46, S. 103–133
- Corwin, Lesch 2005b** CORWIN, D. L.; LESCH, S. M.: *Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity: Part II. Case study*. In: *Computers and Electronics in Agriculture* (2005), Nr. 46, S. 135–152
- Dannowski, Werner 1997** DANNOWSKI, M.; WERNER, A.: *Die Bedeutung von Pflanzenwurzeln bei der ökologischen Beurteilung des Bodengefüges im Labor und in der Landschaft*. In: *Die Bodenkultur - Journal for Land Management, Food and Environment* (1997), Nr. 48, S. 73–88
- Diekkrüger u. a. 1995** DIEKKRÜGER, B.; SÖNDGERATH, D.; KERSEBAUM, K. C.; MCVOY, C. W.: *Validity of agroecosystem models a comparison of results of different models applied to the same data set: Modelling of Geo-Biosphere Processes*. In: *Ecological Modelling* (1995), Nr. 81, S. 3–29
- Dobers, Stuczynski 2005** DOBERS, E. S.; STUCZYNSKI, T.: *Kombination von Informationen aus Bodenkarten und Luftbildern mit dem Transferable Belief Model*. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* (2005), Nr. 107, S. 309–310
- Dowdy, Nater, Dolan 1995** DOWDY, R. H.; NATER, E. A.; DOLAN, M. S.: *Quantification of the length and diameter of root segments with public domain software*. In: *Communications in Soil Science and Plant Analysis* (1995), Nr. 26, S. 459–468
- Durlessen 1999** DURLLESSER, H.: *Bestimmung der Variation bodenphysikalischer Parameter in Raum und Zeit mit elektromagnetischen Induktionsverfahren*. Dissertation. Shaker Verlag, Aachen, Technische Universität München. Dissertation. 1999

- Eastman 2003** EASTMAN, J. R.: *Idrisi Kilimanjaro*. Worcester, Madison, USA: Clark labs for cartographic technology and geographic analysis, Clark University, 2003
- Eißmann 1995** EIBMANN, L.: *Abriss der Quartärgeologie des Saale-Elbe-Raums*. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* (1995), Nr. 77, S. 13–18
- Eitzinger u. a. 2004** EITZINGER, J. ; TRNKA, M. ; HÖSCH, J. ; ZALUD, Z. ; DUBROVSKÝ, M.: *Comparison of CERES, WOFOST and SWAP models in simulating soil water content during growing season under different soil conditions*. In: *Ecological Modelling* (2004), Nr. 171, S. 223–246
- Engels, Molenkopf, Marschner 1994** ENGELS, C.; MOLENKOPF, M.; MARSCHNER, H.: *Effect of drying and rewetting the topsoil on root growth of maize and rape in different soil depths*. In: *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* (1994), Nr. 157, S. 139–144
- Ephrath, Silberbush, Berliner 1999** EPHRATH, J.; SILBERBUSH, M.; BERLINER, P.: *Calibration of minirhizotron readings against root length density data obtained from soil cores*. In: *Plant and Soil* (1999), Nr. 209, S. 201–208
- de Faria, Bowen 2003** FARIA, R. T. de ; BOWEN, W. T.: *Evaluation of DSSAT soil-water balance module under cropped and bare soil conditions*. In: *Brazilian Archives of Biology and Technology* (2003), Nr. 46, S. 489–498
- Fiedler, Hunger 1970** FIEDLER, F.; HUNGER, W.: *Geologische Grundlagen der Bodenkunde und Standortlehre*. Dresden: Steinkopff, 1970
- Fitter 2003** FITTER, A. H.: Characteristics and functions of root systems. In: WASEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Hrsg.): *Plant roots: The hidden half*. 3. Aufl. New York : Marcel Dekker, 2003, S. 15–32
- Florin 2007** FLORIN, M. J.: *Towards Precision Agriculture for whole farms using a combination of simulation modelling and spatially dense soil and crop information*. Dissertation, University of Sydney, Australian Centre for Precision Agriculture, Faculty of Agriculture, Food and Natural Resources. Dissertation. 2007
- Foody 1999** FOODY, G. M.: *The continuum of classification fuzziness in thematic mapping*. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* (1999), Nr. 65, S. 443–451
- Freeman 1970** FREEMAN, H.: Boundary encoding and processing. In: LIPKIN, B. S.; ROSENFELD, A. (Hrsg.): *Picture processing and psychopictorics*. New York: Academic Press, 1970, S. 241–266
- Friedman 2005** FRIEDMAN, S. P.: *Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review*. In: *Computer and Electronics in Agriculture* (2005), Nr. 46, S. 45–70
- Frogbroock u. a. 1999** FROGBROOCK, Z. L.; OLIVER, M. A.; SALAH, M.; ELLIS, R. H.: Comparing the relation in the spatial variation of soil and crop attributes. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): *Precision Agriculture '99*. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture. Sheffield, UK: Sheffield Academic Press, 1999, S. 397–405
- Gabrielle, Menasseri, Houot 1995** GABRIELLE, B.; MENASSERI, S.; HOUOT, S.: *Analysis and field evaluation of the CERES models water balance component*. In: *Soil Science Society of America Journal* (1995), Nr. 59, S. 1403–1412
- Garrison u. a. 1999** GARRISON, M. V.; BATCHELOR, W. D.; KANWAR, R. S.; RITCHIE, J. T.: *Evaluation of the CERES-Maize water and nitrogen balances under tile-drained conditions*. In: *Agricultural Systems* (1999), Nr. 62, S. 189–200

- Ghaffari, Cook, Lee 2001** GHAFFARI, A.; COOK, H. F. ; LEE, H. C.: *Simulating winter wheat yields under temperate conditions: exploring different management scenarios*. In: *European Journal of Agronomy* (2001), Nr. 15, S. 231–240
- Godwin u. a. 1989** GODWIN, D. C.; RITCHIE, J. T.; SINGH, U.; HUNT, L. A.: *A user's guide to CERES-Wheat v2.1*. Muscle Shoals, AL: International Fertilizer Development Center, 1989
- Godwin, Singh 1998** GODWIN, D. C.; SINGH, U.: Nitrogen balance and crop response to nitrogen in upland and lowland cropping systems. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Hrsg.): *Understanding Options for Agricultural Production*. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Publishers, 1998, S. 55–77
- Gordon, Shortcliffe 1985** GORDON, J.; SHORTCLIFFE, E. H.: *A method for managing evidential reasoning in hierarchical hypothesis space*. In: *Artificial Intelligence* (1985), Nr. 26, S. 323–357
- Grabarnik, Pagès, Bengough 1998** GRABARNIK, P.; PAGÈS, L.; BENGOUGH, A. G.: *Geometrical properties of simulated maize root systems: consequences for length density and intersection density*. In: *Plant and Soil* (1998), Nr. 200, S. 157–167
- Greenwood u. a. 1982** GREENWOOD, D. J.; GERWITZ, A.; STONE, D. A.; BARNES, A.: *Root development of vegetable crops*. In: *Plant and Soil* (1982), Nr. 68, S. 75–96
- Gregory u. a. 1978** GREGORY, P. J.; MCGOWAN, M.; BISCOE, P. V.; HUNTER, B.: *Water relations of winter wheat: 1. Growth of the root system*. In: *The Journal of Agricultural Science* (1978), Nr. 91, S. 91–102
- Hartge, Horn 1992** HARTGE, K. H.; HORN, R.: *Die physikalische Untersuchung von Böden*. 3. Aufl. Stuttgart: Enke, 1992
- Hay 1999** HAY, R. K. M.: Physiological control of growth and yield in wheat: Analysis and synthesis. In: SMITH, D. L.; HAMEL, C. (Hrsg.): *Crop yield: Physiology and processes*. 1. Aufl. Berlin: Springer, 1999. – ISBN 354064477639800, S. 1–38
- Heinemann, Hoogenboom, Chojnicki 2002** HEINEMANN, A. B.; HOOGENBOOM, G.; CHOJNICKI, B.: *The impact of potential errors in rainfall observation on the simulation of crop growth, development and yield*. In: *Ecological Modelling* (2002), Nr. 157, S. 1–21
- Herbst 2002** HERBST, R.: *Bodenschätzung, geoelektrische Sondierung und pedostatische Modellierung als Basis von digitalen Hofbodenkarten im Präzisen Landbau*. Dissertation, Universität Kiel, Inst. f. Pflanzenernährung und Bodenkunde. Dissertation. 2002
- Herbst, Lamp 2004** HERBST, R.; LAMP, J.: Strategies from point to spatial information to determine the soil continuum in Precision Agriculture. In: MULLA, D. (Hrsg.): *Proceedings of the 7th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*. Minneapolis, MN, USA, 2004
- Herbst, Lamp 2006** HERBST, R.; LAMP, J.: *Precise Soil Texture Inventory by an On-the-go Sensor EM38* Philadelphia, Pennsylvania, USA: 2006
- Himmelbauer, Loiskandl, Kastanek 2004** HIMMELBAUER, M. L.; LOISKANDL, W.; KASTANEK, F.: *Estimating length, average diameter and surface area of roots using two different Image analyses systems*. In: *Plant and Soil* (2004), Nr. 260, S. 111–120
- Hoogenboom u. a. 2003** HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; GIJSMAN, A. J.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; BOWEN, W. T.: *Cropping System Simulation Model*. In: HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; PORTER, C. H.; WILKENS, P. W.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; TSUJI, G. Y. (Hrsg.):



*Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0 : Volume 1: Overview.* Honolulu, HI, 2003, S. 9–60

**Hsiao, Bradford 1983** HSIAO, T. C.; BRADFORD, K. J.: Physiological consequences of cellular water deficits. In: TAYLOR, H. M.; JORDAN, W. R.; SINCLAIR, T. R. (Hrsg.): *Limitations to efficient water use in crop production*. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, 1983. – ISBN 0891180745, S. 227–265

**Hunt, Boote 1998** HUNT, L. A.; BOOTE, K. J.: Data for model operation, calibration and evaluation. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Hrsg.): *Understanding Options for Agricultural Production*. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Publishers, 1998, S. 9–40

**Hunt u. a. 1993** HUNT, L. A.; PARARAJASINGHAM, S.; JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; IMAMURA, D. T.; OGOSHI, R. M.: *GENCALC: Software to Facilitate the Use of Crop Models for Analyzing Field Experiments*. In: *Agronomy Journal* (1993), Nr. 85, S. 1090–1094

**Isaaks, Srivastava 1990** ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M.: *An introduction to applied geostatistics*. New York: Oxford University Press, 1990. – ISBN 0195050126

**Jamieson u. a. 1998 J** AMIESON, P. D.; PORTER, J. R.; GOUDRIAAN, J.; RITCHIE, J. T.; VAN KEULEN, H.; STOL, W.: *A comparison of the models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat, Sirius, SUCROS2 and SWHEAT with measurements from wheat grown under drought*. In: *Field Crops Research* (1998), Nr. 55, S. 23–44

**Jones u. a. 2003a** JONES, J. W.; HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; BOOTE, K. J.; BATCHELOR, W. D.; HUNT, L. A.; WILKENS, P. W.; SINGH, U.; GIJSMAN, A. J.; RITCHIE, J. T.: *The DSSAT cropping system model*. In: *Agronomy Journal* (2003), Nr. 18, S. 235–265

**Jones u. a. 2003b** JONES, J. W. (Hrsg.); HOOGENBOOM, G. (Hrsg.); WILKENS, P. W. (Hrsg.): *Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0: Volume 4: Crop Model Documentation*. Honolulu, HI, 2003

**Kaspar, Ewing 1997** KASPAR, T. C.; EWING, R. P.: *Rootedge: Software for measuring root length from desktop scanner images*. In: *Agronomy Journal* (1997), Nr. 89, S. 932–940

**King u. a. 2003** KING, J. A.; DAMPNEY, P. M. R.; LARK, M.; WHEELER, H. C.; BRADLEY, R. I.; MAYR, T. R.; RUSSILL, N.: *Evaluation of Non-intrusive sensors for measuring soil physical properties : HGCA Project Report No 302*, 2003

**Klepper 1992** KLEPPER, B.: Development and Growth of Crop Root Systems. In: HATFIELD, J. L.; STEWART, B. A. (Hrsg.): *Limitations to Plant Root Growth (Advances in Soil Science)*. New York : Springer, 1992, S. 1–25

**Klimanek 1987** KLIMANEK, E. M.: *Ernte- und Wurzelrückstände landwirtschaftlich genutzter Fruchtarten* FORSCHUNGSZENTRUM FÜR BODENFRUCHTBARKEITMünchberg : Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR, 1987

**Konar 2005** KONAR, A.: *Computational Intelligence : Principles, Techniques and Applications*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2005. – ISBN 9783540273356

**Kramer, Boyer 1995** KRAMER, P. J.; BOYER, J. S.: *Water Relations of Plants and Soils*. 2. Aufl., 1995

**Kücke, Schmid, Spiess 1995** KÜCKE, M.; SCHMID, H.; SPIESS, A.: *A comparison of four methods for measuring roots of field crops in three contrasting soils*. In: *Plant and Soil* (1995), Nr. 172, S. 63–71

- Laboski u. a. 1998** LABOSKI, C. A. M.; DOWDY, R. H.; ALLMARAS, R. R.; LAMB, J. A.: *Soil strength and water content influences on corn root distribution in a sandy soil*. In: *Plant and Soil* (1998), Nr. 203, S. 239–247
- Lambers, Chapin, Pons 2008** LAMBERS, H.; CHAPIN, F. S.; PONS, T. L.: *Plant physiological ecology*. 2. Aufl. Berlin : Springer, 2008. – ISBN 0387983260
- Lamp 1987** LAMP, J.: *Digitale Hofbodenkarten : Grundlage für die Prozesssteuerung in der Pflanzenproduktion*. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* (1987), Nr. 53, S. 55–60
- Langensiepen u. a. 2008** LANGENSIEPEN, M.; HANUS, H.; SCHOOP, P.; GRÄSLE, W.: *Validating CERES-wheat under North-German environmental conditions*. In: *Agricultural Systems* (2008), Nr. 97, S. 34–47
- Lein 2003** LEIN, J. K.: *Applying evidential reasoning methods to agricultural land cover classification*. In: *International Journal of Remote Sensing* (2003), Nr. 24, S. 4161–4180
- Lesch, Corwin, Robinson 2005** LESCH, S. M.; CORWIN, D. L.; ROBINSON, D. A.: *Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils*. In: *Computers and Electronics in Agriculture* (2005), Nr. 46, S. 351–378
- Malik u. a. 2002** MALIK, A. I.; COLMER, T. D.; LAMBERS, H.; SCHORTEMEYER, M.: *Changes in physiological and morphological traits of roots and shoots of wheat in response to different depths of waterlogging*. In: *Australian Journal of Plant Physiology* (2002), Nr. 28, S. 1121–1131
- Manske, Vlek 2003** MANSKE, G. B.; VLEK, P. L. G.: *Root Architecture: Wheat as a Model Plant*. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Hrsg.): *Plant roots: The hidden half*. 3. Aufl. New York: Marcel Dekker, 2003, S. 249–259
- McBratney 2003** MCBRATNEY, A. B.: *On digital soil mapping*. In: *Geoderma* (2003), Nr. 117, S. 3–52
- McBratney, Pringle 1997** MCBRATNEY, A. B.; PRINGLE, M. J.: *Spatial variability in soil: Implications for precision agriculture*. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): *Precision Agriculture '97: Spatial variability in soil and crop*. Proceedings of the 1st European Conference on Precision Agriculture. Oxford, UK: Bios Scientific Publishers, 1997, S. 3–31
- McNeill 1980** MCNEILL, J. D.: *Electrical conductivity on rocks*. In: GEONICS (HRSG.): *Technical Notes (TN-6)*. Ontario, CA, 1980, S. 6–8
- Meier 2001** MEIER, U.: *Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen: BBCH-Monografie*. URL <http://www.bba.de/veroeff/bbch/bbchdeu.pdf> – Überprüfungsdatum 2009-04-16
- Mestwerdt 1914** MESTWERDT, A.: *Erläuterungen zur geologischen Karte : Blatt Groß Twülpstedt*. Hannover: Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, 1914
- Meyer u. a. 1990** MEYER, W. S.; TAN, C. S.; BARRS, H. D.; SMITH, R. C. G.: *Root growth and water uptake by wheat during drying of undisturbed and repacked soil in drainage lysimeters*. In: *Australian Journal of Soil Research* (1990), Nr. 41, S. 253–265
- Minasny, McBratney, Whelan 2005** MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; WHELAN, B. M.: *VESPER*. 1.62. NSW: Australian Centre for Precision Agriculture, University of Sydney, 2005. URL <http://www.usyd.edu.au/agric/acpa/vesper/vesper.html> – Überprüfungsdatum 2009-04-29

- Montagu, Conroy, Atwell 2001** MONTAGU, K. D.; CONROY, J. P.; ATWELL, B. J.: *The position of localized soil compaction determines root and subsequent shoot growth responses*. In: *Journal of Experimental Botany* (2001), Nr. 52, S. 2127–2133
- Musters, Bouten 2000** MUSTERS, P. A. D.; BOUTEN, W.: *A method for identifying optimum strategies of measuring soil water contents for calibrating a root water uptake model*. In: *Journal of Hydrology* (2000), Nr. 227, S. 273–286
- National Research Council 1997** NATIONAL RESEARCH COUNCIL: *Precision Agriculture in the 21st Century*. Washington, DC: National Academy Press, 1997
- Newman 1966** NEWMAN, E. I.: *A method for estimating the total length of root in a sample*. In: *Journal of Applied Ecology* (1966), Nr. 3, S. 139–145
- Otter-Nacke 1986** OTTER-NACKE, S.; GODWIN, D. C.; RITCHIE, J. T.: *Testing and validating the CERES-wheat model in diverse environments*. Temple, TX: USDA-ARS, 1986
- Pan, Bolton 1991** PAN, W. L.; BOLTON, R. P.: *Root Quantification by Edge Discrimination Using a Desktop Scanner*. In: *Agronomy Journal* (1991), Nr. 83, S. 1047–1052
- Passioura 1996** PASSIOURA, J. B.: *Simulation models: Science, snake oil, education, or engineering?* In: *Agronomy Journal* (1996), Nr. 88, S. 690–694
- Passioura 2002** PASSIOURA, J. B.: *Soil conditions and plant growth*. In: *Plant, Cell and Environment* (2002), Nr. 25, S. 311–318
- Phene u. a. 1991** PHENE, C. J.; DAVIS, K. R.; HUTMACHER, R. B.; BAR-YOSEF, B.; MEEK, D. W.; MISAKI, J.: *Effect of high frequency surface and subsurface drip irrigation on root distribution of sweet corn*. In: *Irrigation Science* (1991), Nr. 12, S. 135–140
- Polomski, Kuhn 2003** POLOMSKI, J.; KUHN, N.: *Root research methods*. In: WASEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Hrsg.): *Plant roots: The hidden half*. 3. Aufl. New York: Marcel Dekker, 2003, S. 295–321
- Porter, Jamieson, Wilson 1993** PORTER, J. R.; JAMIESON, P. D.; WILSON, D. R.: *Comparison of the wheat simulation models AFRCWHEAT2, CERES-Wheat and SWHEAT for non-limiting conditions of crop growth*. In: *Field Crops Research* (1993), Nr. 33, S. 131–157
- Prasad 1988** PRASAD, R.: *A linear root water uptake model*. In: *Journal of Hydrology* (1988), Nr. 99, S. 297–306
- Reuter 2006** REUTER, A.: *Biomassebildung und Nährstoffaneignungsvermögen der Wurzeln in experimentellen Grünlandbeständen mit unterschiedlicher Pflanzenartenzusammensetzung*. Dissertation, Universität Bayreuth, Fakultät f. Biologie, Chemie und Geowissenschaften. 2006
- Reynolds, Acock 1985** REYNOLDS, J. F.; ACOCK, B.: *Predicting the response of plants to increasing carbon dioxide: A critique of plant growth models*. In: *Ecological Modelling* (1985), Nr. 29, S. 107–129
- Richner u. a. 2000** RICHNER, W.; LIEGENS, M.; BÜRGI, H.; SOLDATI, A.; STAMP, P.: *Root image analysis and interpretation*. In: SMIT, A. L.; BENGOUGH, A. G.; ENGELS, C.; VAN NOORDWIJK, M.; PELLERIN, S.; VAN DE GEIJN, S. C. (Hrsg.): *Root Methods : A Handbook*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2000, S. 305–330
- Ritchie 1972** RITCHIE, J. T.: *Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover*. In: *Water Resources Research* (1972), Nr. 8, S. 1204–1213

- Ritchie 1998** RITCHIE, J. T.: Soil water balance and plant water stress. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Hrsg.): *Understanding Options for Agricultural Production*. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Publishers, 1998, S. 41–54
- Ritchie, Godwin, Otter-Nacke 1988** RITCHIE, J. T.; GODWIN, D. C.; OTTER-NACKE, S.: *CERES Wheat: A simulation model of wheat growth and development*. Austin, TX, USA: Texas A&M University Press, 1988
- Ritchie, Otter 1985** RITCHIE, J. T.; OTTER, S.: *Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model* 1985, S. 159–175
- Ritchie u. a. 1998** RITCHIE, J. T.; SINGH, U.; GODWIN, D. C.; BOWEN, W. T.: Cereal growth development and yield. In: TSUJI, G. Y.; HOOGENBOOM, G.; THORNTON, P. K. (Hrsg.): *Understanding Options for Agricultural Production*. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Publishers, 1998, S. 79–98
- Robert, Anderson 1987** ROBERT, P.; ANDERSON, P.: Use of computerized soil survey reports in county extension offices. In: BEEK, J. K.; BURROUGH, P. A.; MCCORMACK, E. D. (Hrsg.): *Quantitative land evaluation procedures*. Enschede, NL: ITC Publication 6, 1987, S. 119–121
- Robertson u. a. 1993** ROBERTSON, M. J.; FUKAI, S.; HAMMER, G. L.; LUDLOW, M. M.: *Modelling root growth of grain sorghum using the CERES approach*. In: *Field Crops Research* (1993), Nr. 33, S. 113–130
- Roth u. a. 1987** ROTH, D.; WERNER, D.; KRUMBIEGEL, D.; WENDLING, U.: *Modellparameter und Modellrechnungen zur Ermittlung des Niederschlags- und Zusatzwasserbedarfes landwirtschaftlicher Fruchtarten in Abhängigkeit von Standort und Witterung*. In: *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* (1987), Nr. 31, S. 531–541
- Sadler u. a. 2000** SADLER, E. J.; Gerwig B. K.; EVANS, D. E.; BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.: *Site-specific modeling of corn yield in the SE coastal plain*. In: *Agricultural Systems* (2000), Nr. 64, S. 189–207
- Sarkar, Kar 2008** SARKAR, R.; KAR, S.: *Sequence analysis of DSSAT to select optimum strategy of crop residue and nitrogen for sustainable rice-wheat rotation*. In: *Agronomy Journal* (2008), Nr. 100, S. 87–97
- Sau u. a. 2004** SAU, F.; BOOTE, K. J.; MCNAIR BOSTICK, W.; JONES, J. W.; MINGUEZ, M. I.: *Testing and Improving Evapotranspiration and Soil Water Balance of the DSSAT Crop Models*. In: *Agronomy Journal* (2004), Nr. 96, S. 1243–1257
- Savin, Hall, Satorre 1994** SAVIN, R.; HALL, A. J.; SATORRE, E. H.: *Testing the root growth subroutine of the CERES-Wheat model for two cultivars of different cycle length*. In: *Field Crops Research* (1994), Nr. 38, S. 125–133
- Schroetter, Rogasik, Schnug 2006** SCHROETTER, S.; ROGASIK, J.; SCHNUG, E.: Root Growth and Agricultural Management. In: LAL, R. (Hrsg.): *Encyclopedia of Soil Science*. New York: Marcel Dekker, 2006, S. 1531–1534
- Shafer 1976** SHAFER, G.: *A mathematical theory of evidence*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1976
- Sharma, Chaudhary 1983** SHARMA, R. B.; CHAUDHARY, T. N.: *Wheat root growth, grain yield and water uptake as influenced by soil water regime and depth of nitrogen placement in a loamy sand soil*. In: *Agricultural Water Management* (1983), Nr. 6, S. 365–373

- Sharma, Ghildyal 1977** SHARMA, R. B.; GHILDYAL, B. P.: *Soil-water-root relations in wheat: Water extraction rate of wheat roots that develop under dry and moist conditions*. In: *Agronomy Journal* (1977), Nr. 69, S. 231–233
- Smit u. a. 2000** SMIT, A. L. (Hrsg.); BENGOUGH, A. G. (Hrsg.); ENGELS, C. (Hrsg.): *Root Method : A Handbook*. Berlin, Heidelberg, New York : Springer, 2000
- Smit u. a. 1994** SMIT, A. L.; SPRANGERS, J. F. C. M.; SABLIK, P. W.; GROENWOLD, J.: *Automated measurements of root length with a three-dimensional high-resolution scanner and image analysis*. In: *Plant and Soil* (1994), Nr. 158, S. 145–149
- Smith, Hamel 1999** SMITH, D. L. (Hrsg.); HAMEL, C. (Hrsg.): *Crop yield: Physiology and processes*. 1. Aufl. Berlin: Springer, 1999. – ISBN 354064477639800
- Smucker u. a. 1987** SMUCKER, A. J. M.; FERGUSON, J. C.; DEBRUYN, W. P.; BELFORD, R. L.; RITCHIE, J. T.: *Image analysis of video recorded plant root systems*. In: TAYLOR, H. M. (Hrsg.): *Minirhizotron Observation tubes: Methods and Applications for Measuring Rhizosphere Dynamics*. Madison, Wisconsin: ASA Spec Publ no 50, 1987, S. 67–80
- Sommer u. a. 2003** SOMMER, M.; WEHRHAN, M.; ZIPPRICH, M.; WELLER, U.; CASTELL, W.; EHRICHS, S.; TANDLER, B.; SELIGE, T.: *Hierarchical data fusion for mapping soil units at field scale*. In: *Geoderma* (2003), Nr. 112, S. 179–196
- Srinivasan 2006** SRINIVASAN, A. (Hrsg.): *Handbook of Precision Agriculture: Principles and applications*. Binghampton, NY: Food Products Press, 2006
- Srinivasan, Richards 1990** SRINIVASAN, A.; RICHARDS, J.: *Knowledge-based techniques for multi-source classification*. In: *International Journal of Remote Sensing* (1990), Nr. 11, S. 505–525
- Statistisches Bundesamt 27.05.2005** STATISTISCHES BUNDESAMT: *Anbaufläche von Weizen und Raps steigt*. 27.05.2005. URL [http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2005/05/PD05\\_\\_236\\_\\_411,templateId=renderPrint.psml](http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Presse/pm/2005/05/PD05__236__411,templateId=renderPrint.psml). – Aktualisierungsdatum: 2005-05-27 – Überprüfungsdatum 2008-11-01
- Sudduth, Drummond, Kitchen 2001** SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; KITCHEN, N. R.: *Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture*. In: *Computer and Electronics in Agriculture* (2001), Nr. 31, S. 239–264
- Taylor, Brar 1991** TAYLOR, H. M.; BRAR, G. S.: *Effects of soil compaction on root development*. In: *Soil and Tillage Research* (1991), Nr. 19, S. 111–119
- Tennant 1975** TENNANT, D.: *A test of modified line intersect method of estimating root length*. In: *Journal of Ecology* (1975), Nr. 63, S. 995–1001
- Timsina, Humphreys 2006** TIMSINA, J.; HUMPHREYS, E.: *Performance of CERES-Rice and CERES-Wheat models in rice-wheat systems: A review*. In: *Agricultural Systems* (2006), Nr. 90, S. 5–31
- Tolk 2003** TOLK, J. A.: *Plant available Soil Water*. In: TRIMBLE, S. T.; STEWART, B. A.; HOWELL, T. A. (Hrsg.): *Encyclopedia of Water Science*. New York: Marcel Dekker, 2003, S. 669–672
- Trought, Drew 1980** TROUGHT, M. C. T.; DREW, M. C.: *The Development of Waterlogging Damage in Young Wheat Plants in Anaerobic Solution Cultures*. In: *Journal of Experimental Botany* (1980), Nr. 31, S. 1573–1585

- Tsuji, Hoogenboom, Thornton 1998** TSUJI, G. Y. (Hrsg.); HOOGENBOOM, G. (Hrsg.); THORNTON, P. K. (Hrsg.): *Understanding Options for Agricultural Production*. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Publishers, 1998
- Vamerali u. a. 2003** VAMERALI, T.; GUARISE, M.; GANIS, A.; BONA, S.; MOSCA, G.: *Analysis of root images from auger sampling with fast procedure: a case of application to sugar beet*. In: *Plant and Soil* (2003), Nr. 255, S. 387–397
- van Meirvenne, Cockx, Vitharana 2005** VAN MEIRVENNE, M.; COCKX, L.; VITHARANA, U.: *Pedometrics in Transition: From too few to too many data?* In: GRUNWALD, S. (Hrsg.): *Pedometrics 2005: Frontiers in Pedometrics*. Biannual Meeting of Commission 1.5 Pedometrics: Book of abstracts. Naples, Florida, USA, 2005, S. 81
- Viera 1999** VIERA, S.: Geostatistical applications in mapping of crop yield and soil properties. In: STAFFORD, J. V. (Hrsg.): *Precision Agriculture '99*. Proceedings of the 2nd European Conference on Precision Agriculture. Sheffield, UK: Sheffield Academic Press, 1999, S. 365–373
- Vrugt u. a. 2001** VRUGT, J. A.; VAN WIJK, M. T.; HOPMANS, J. W.; SIMUNEK, J.: *One-, two- and three-dimensional root water uptake functions for transient modeling*. In: *Water Resources Research* (2001), Nr. 37, S. 2457–2470
- Wallach, Makowski, Jones 2006** WALLACH, D. (Hrsg.); MAKOWSKI, D. (Hrsg.); JONES, J. W. (Hrsg.): *Working with Dynamic Crop Models: Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications*. 1. Aufl. Amsterdam, NL: Elsevier, 2006
- Watson, Lapins, Barron 1976** WATSON, E. R.; LAPINS, P.; BARRON, R. J. W.: *Effect of waterlogging on the growth, grain and straw yield of wheat, barley and oats*. In: *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry* (1976), Nr. 16, S. 114–122
- Wechsung u. a. 2008** WECHSUNG, F. (Hrsg.); GERSTENGARBE, F. -W (Hrsg.); LASCH, P. (Hrsg.): *Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel*. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, 2008
- Wegehenkel 2000** WEGEHENKEL, M.: *Test of a modelling system for simulating water balances and plant growth using various different complex approaches*. In: *Ecological Modelling* (2000), Nr. 129, S. 39–64
- Wehrhan u. a. 2008** WEHRHAN, M.; KÜHN, J.; BRENNING, A.; ROGASIK, H.; SOMMER, M.: Methoden zur integrativen, nicht-invasiven Standortanalyse zur Charakterisierung der pflanzenbaulich relevanten Eigenschaften standortheterogener Ackerflächen. In: WERNER, A.; DREGER, F.; SCHWARZ, J. (Hrsg.): *Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung : preagro II*. Abschlussbericht. Münchenberg : Leibnitz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., 2008, S. 65–92
- Weir, Barraclough 1986** WEIR, A. H.; BARRACLOUGH, P. B.: *The effect of drought on the root growth of winter wheat and on its water uptake from a deep loam*. In: *Soil Use and Management* (1986), Nr. 2, S. 91–96
- Werner, Dreger, Schwarz 2008** WERNER, A. (Hrsg.); DREGER, F. (Hrsg.); SCHWARZ, J. (Hrsg.): *Informationsgeleitete Pflanzenproduktion mit Precision Farming als zentrale inhaltliche und technische Voraussetzung für eine nachhaltige Entwicklung der landwirtschaftlichen Landnutzung : preagro II*. Abschlussbericht. Münchenberg: Leibnitz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V., 2008

**Whalley u. a. 2008** WHALLEY, W.; WATTS, C.; GREGORY, A.; MOONEY, S.; CLARK, L.; WHITMORE, A.: *The effect of soil strength on the yield of wheat*. In: *Plant and Soil* (2008), Nr. 306, S. 237–247

**Williams, Jones, Dyke 1984** WILLIAMS, J. R.; JONES, C. A.; DYKE, P. T.: *A modeling approach to determining the relationships between erosion and soil productivity* 1984, S. 129–144

**Xevi, Gilley, Feyen 1996** XEVI, E.; GILLEY, J.; FEYEN, J.: *Comparative study of two crop yield simulation models*. In: *Agricultural Water Management* (1996), Nr. 30, S. 155–173

**Zadocks, Chang, Konzak 1974** ZADOCKS, J. C.; CHANG, T. T.; KONZAK, F. C.: *A decimal code for the growth stages of cereals*. In: *Weed Research* (1974), Nr. 14, S. 415–421

**Zebisch u. a. 2005** ZEBISCH, M.; GROTHMANN, T.; SCHRÖTER, D.; HASSE, C.; FRITSCH, U.; CRAMER, W.: *Klimawandel in Deutschland : Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimaintensiver Systeme*. Forschungsbericht 201 41 253. URL <http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/2947.pdf>

**Zuo u. a. 2004** ZUO, Q.; JIE, F. ; ZHANG, R. ; MENG, L.: *A Generalized Function of Wheat's Root Length Density Distributions*. In: *Vadose Zone Journal* (2004), Nr. 3, S. 271–277





# Danksagung

Mein herzlicher Dank gilt Ruprecht Herbst und Matthias Langensiepen für die fachliche sowie persönliche Betreuung während der Anfertigung dieser Arbeit, für kritische Anmerkungen und positive Bestärkung sowie für eine ausgesprochen angenehme Arbeitsatmosphäre und dafür, jederzeit für die Beantwortung von Fragen oder auch einfach für ein nettes Gespräch zur Verfügung gestanden zu haben.

Dr. Armin Werner danke ich für die bereitwillige Übernahme des Drittgutachtens trotz der besonderen Umstände.

Vielen Dank an Ulrich Wagner von der WIMEX Agrarprodukte Import & Export GmbH und Wolfgang Täger-Farny vom Betrieb Täger-Farny dafür, dass sie ihre Flächen für unsere Versuche zur Verfügung gestellt haben. An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Täger-Farny für die Freundlichkeit und gute Laune bedanken, mit der mir jederzeit gegenüber getreten wurde, obwohl wir den Versuchsschlag teilweise sehr strapaziert haben.

Vielen Dank auch an Jens Kohl vom Betrieb Täger-Farny für seine erheiternde Hilfe beim Einbau der Sensoren und bei der Wurzelprobennahme.

Ein besonderer Dank gilt den Hilfskräften Miguel, Tilmann und Claudia:

Miguel und Tilman insbesondere für die tat- und vor allem schlagkräftige Unterstützung im Feld und Claudia für die große Hilfe beim aufwändigen Auswaschen der Wurzeln und für ihre selbständige Arbeitsweise, die mir Vieles erleichtert hat.

Den technischen Mitarbeitern des Fachgebietes Agrartechnik danke ich für sagenhaft prompte Reparaturen von gerissenen Sensorkabeln oder kaputten Wurzelbohrern und für die nette Ablenkung beim eintönigen Wurzelwaschen.

Vielen Dank an Jans Bobert für die tolle Zusammenarbeit im Feld, hilfreiche Tipps und vor allem für den gemeinsam gefochtenen und schließlich gewonnenen Kampf mit dem Modell.

Auch den übrigen Mitarbeitern und Kollegen aus dem *preagro II*-Verbund gilt mein Dank für die gute Zusammenarbeit, Beantwortung von Fragen, hilfreiche Diskussionen oder auch Planung und Durchführung von Versuchen.

Ein herzlicher Dank an alle Nordlichter für ihre rege Anteilnahme am Fortschreiten der Arbeit.

Ein großes Danke an Heike für die regelmäßigen und überaus netten Mittagspausen, in denen mein Kopf immer so gut abschalten konnte, und ohne die ich wohl manchmal das Essen einfach vergessen hätte.

Scarlett für die eindringliche Versicherung, dass alles normal ist und gut wird.

Meinen Lieben für ihre Unterstützung in jeglicher Hinsicht und für dieses scheinbar selbstverständliche Vertrauen in das, was ich tue.

An Christa, ohne große Worte und Erklärungen: DANKE...

Schließlich und vor allem Danke an Wilma und Nils. Für euer Dasein, für den Alltag und ein Leben fern vom Arbeitsstress und dafür, mich immer wieder auf den Boden der Tatsachen zurückgeholt zu haben.



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel angefertigt habe und dass die Arbeit bisher weder in Teilen noch als Ganzes einem Promotionsverfahren zugrunde lag.

Berlin, 28. April 2009

Anna Schulte-Eickholt